

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Теплоенергетичний факультет

Кафедра теоретичної і промислової теплотехніки

«На правах рукопису»
УДК 621.365.32

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Г.Б.Варламов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»,
спеціалізації «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження»
на тему: «Підвищення ефективності печей для переплавки алюмінієвого брухту»

Виконав: студент II курсу, групи ТП – 61 м Боянівський Владислав Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н. Боженко М.Ф. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультанти: з мат. моделювання к.т.н. Кутра Д.С. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

з охорони праці к.т.н., доцент Каштанов С.Ф. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація на тему «Підвищення ефективності печей для переплавки алюмінієвого брухту»: 104 с., 35 рис., 12 табл., 4 додатки, 15 джерел.

Об'єкт дослідження – піч для переплавки алюмінієвого брухту.

Мета роботи – підвищення енергетичної ефективності та удосконалення конструкції печей для переплавки алюмінієвого брухту.

Проаналізовані основні способи підвищення енергетичної ефективності.

Наведені результати розрахунків енергетичної ефективності печі місткістю 6 т, потужністю 600 кВт, для переплавки алюмінієвого брухту.

Показано, що за рахунок зменшення терміну відкриття форкамер знизилися витрати підведеної теплоти в печі на 45 %, а за рахунок зміни теплоізоляційних шарів - на 21 %.

Підібрані газоспалюючі пристрої – пальники типу ГПП-5 та наведена схема їх розміщення в боковій передній стінці печі.

Виконані розрахунки енергетичної та економічної ефективності перевodu печі з електричного нагріву на газовий, при цьому для газового нагріву витрати підведеної теплоти зменшуються на 9 – 10 % порівняно з електричним.

Розрахунками визначено, що використання газового нагріву порівняно з електричним економічно більш ефективно, оскільки витрати на природний газ в циклі плавки для модернізованої печі потужністю 600 кВт зменшуються приблизно на 10 %.

Розроблена конструкція печі з нахиленим склепінням, для якої порівняно з традиційним зменшується термін плавки у середньому на 11 %, а ККД підвищується на 7 %.

Для утилізації теплоти димових газів обрано односторонньо-голчастий металевий рекуператор для підігріву дуттьового повітря з площею поверхні нагріву 12 м².

В результаті встановлення рекуператора температура димових газів знижується від 800 °С до 390 °С, при цьому температура дуттьового повітря підвищується від 20 °С до 350 °С. Величина економії палива складає 16,9 %.

На базі програмного забезпечення Solid Works побудовані геометричні моделі багатошарових стінок печі та отримані результати розподілу температурних полів по товщині огорожувальних конструкцій. Наведені результати співставні з експериментальними даними отриманими на реальних печах.

Передбачені заходи з безпечної і комфортної роботи в приміщенні науково-дослідної лабораторії та заходи з пожежної безпеки та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Розроблено стартап-проект за шаблоном Business Model Canvas.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: піч, алюмінієвий брухт, огороження, теплоізоляція, термін плавки, енергетична ефективність, електричний і газовий нагрів, рекуператор, ККД.

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация на тему «Повышение эффективности печей для переплавки алюминиевого лома» 104 с., 35 рис., 12 табл., 4 приложения, 15 источников.

Объект исследования - печь для переплавки алюминиевого лома.

Цель работы - повышение энергетической эффективности и совершенствование конструкции печей для переплавки алюминиевого лома.

Проанализированы основные способы повышения энергетической эффективности.

Приведены результаты расчетов энергетической эффективности печи вместимостью 6 т, мощностью 600 кВт, для переплавки алюминиевого лома.

Показано, что за счет уменьшения срока открытия форкамер снизились расходы подведенной теплоты в печи на 45%, а за счет изменения теплоизоляционных слоев - на 21%.

Выбраны газосжигающие устройства - горелки типа ГПП-5 и приведена схема их размещения в боковой передней стенке печи.

Выполнены расчеты энергетической и экономической эффективности перевода печи с электрического нагрева на газовый, при этом для газового нагрева расходы подведенной теплоты уменьшаются на 9 - 10% по сравнению с электрическим.

Расчетами установлено, что использование газового нагрева по сравнению с электрическим экономически более эффективно, поскольку затраты на природный газ в цикле плавки для модернизированной печи мощностью 600 кВт уменьшаются примерно на 10%.

Разработана конструкция печи с наклонным сводом, для которой по сравнению с традиционным уменьшается срок плавки в среднем на 11%, а КПД повышается на 7%.

Для утилизации теплоты дымовых газов выбран односторонне-игольчатый металлический рекуператор для подогрева дутьевого воздуха с площадью поверхности нагрева 12 м².

В результате установки рекуператора температура дымовых газов снижается от 800 °С до 390 °С, при этом температура дутьевого воздуха повышается от 20 °С до 350 °С. Величина экономии топлива составляет 16,9%.

На базе программного обеспечения Solid Works построены геометрические модели многослойных стенок печи и получены результаты распределения температурных полей по толщине ограждающих конструкций. Приведены результаты сопоставимы с экспериментальными данными полученными на реальных печах.

Предусмотрены меры по безопасной и комфортной работе в помещении научно-исследовательской лаборатории.

Разработан стартап-проект по шаблону Business Model Canvas.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: печь, алюминиевый лом, ограждения, теплоизоляция, срок плавки, энергетическая эффективность, электрический и газовый нагрев, рекуператор, КПД.

SUMMARY

Master's dissertation on "Improving the efficiency of furnaces for aluminum scrap remelting": 104 p., 35 f., 12 tables, 4 applications, 15 sources.

The object of the study is an oven for aluminum scrap remelting.

The purpose of the work is to increase energy efficiency and improve the design of furnaces for aluminum scrap remelting.

Analyzed the main ways of improving energy efficiency.

Presented the results of calculations of the energy efficiency of a 6-ton capacity kiln with a capacity of 600 kW for the remelting of aluminum scrap.

It is shown that due to reduction of the opening time of the firebox, the cost of the supplied heat in the furnace decreased by 45% and due to the change of the thermal insulation layers - by 21%.

Selected gas-fired devices - burners type GPP-5 and the scheme of their placement in the side of the front wall of the furnace.

The calculations of the energy and economic efficiency of the furnace conversion from the electric heating to the gas have been performed, while for the gas heating the costs of the supplied heat are reduced by 9 - 10% in comparison with the electric one.

Calculations have shown that the use of gas heating compared to electric is economically more efficient, since the cost of natural gas in the melt cycle for a 600 kW upgraded furnace decreases by about 10%.

Developed the furnace design with an inclined vault for which the average melting time decreases by 11% compared to the traditional one, and the efficiency increases by 7%.

For utilization of flue gases heat was chosen one-sided-needle metal recuperator for heating of blown air with the area of the heating surface 12 m^2 .

As a result of the installation of the recuperator, the temperature of the flue gases is reduced from 800 °C to 390 °C, while the ambient air temperature rises from 20 °C to 350 °C. The amount of fuel savings is 16.9 %.

Based on the Solid Works software, constructed geometric models of the multilayer walls of the furnace and obtained the results of the distribution of temperature fields along the thickness of the enclosing structures. The presented results are comparable to the experimental data obtained on real furnaces.

Made provision for safe and comfortable work in the premises of a research laboratory and fire and safety measures in emergencies.

A startup project based on the Business Model Canvas template has been developed. **KEYWORDS:** oven, aluminum scrap, fencing, thermal insulation, melting term, energy efficiency, electric and gas heating, recuperator, efficiency.

ВСТУП

Алюміній – один з найважливіших кольорових металів, який займає лідируючі позиції з випуску та використанню серед конструкційних матеріалів. Він широко застосовується як у чистому вигляді так і в сплавах з іншими металами..

У зв'язку з цим до технологічних можливостей основного та додаткового обладнання, призначеного для виробництва якісних алюмінієвих виробів ставлять все більш високі вимоги. Основними напрямками подальшого розвитку алюмінієвого виробництва є підвищення комплексного використання перероблюваної сировини (брухту) в процесі виробництва алюмінію, використання нових прогресивних енергозберігаючих технологій.

На алюмінієвих заводах із завершеним технологічним циклом використовуються стаціонарні печі для переплавки алюмінієвого брухту, які можуть працювати на двох видах обігріву – електричному та газовому.

Для розплавлення твердого алюмінію та підтримки необхідної температури розплаву в печі застосовують необхідні нагрівальні пристрої, вибір яких проводиться на основі складання та розрахунку енергетичних балансів.

Робочий простір печі виконаний у вигляді футерованої прямокутної камери з подиною, боковими і торцевими стінками та склепінням. Камера має дві зони: нижню, де знаходиться алюміній після розплавлення завантаженого брухту, та верхню (без розплаву). В одній з бокових стінок розташовані форкамери, через які завантажується алюмінієвий брухт і знімається шлак, та летка для виливання алюмінію. Футеровка поверхонь наявних печей виконана послідовно з вогнетривких матеріалів (корунд, шамот), а теплоізоляція – з пінодіатоміту і азбесту для подини, торцевих і бокових стінок, та пінодіатоміту і вермикуліту для склепіння.

В НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблена методика розрахунку енергетичних балансів печей для переплавки алюмінієвого брухту, в результаті можуть бути визначені термін плавки і необхідна потужність зовнішніх нагрівальних пристроїв. Розрахунки втрат теплоти зовнішніми огороженнями електричної печі наявної конструкції місткістю 6 т показали, що найбільше їх питоме значення характерно для сталевих листів, які закривають струмовідводи, і поверхонь закритих форкамер; далі за цим показником розташовуються торцеві і бокові стінки в розплаві, ці ж стінки вище рівня розплаву, подина та склепіння. Для оцінки енергетичної ефективності печі були виконані варіантні розрахунки, що відрізнялися від базового варіанту заміною теплоізоляції, розмірами і терміном відкриття форкамер. Показано, що часткова заміна теплоізоляції з пінодіатоміта на силікат кальція в конструкціях подини, склепіння, бокових і торцевих стінок призводить до зменшення тепловтрат через ці огороження приблизно на 25 %. Але найбільший ефект зі зниження теплових втрат досягається при зменшенні площі форкамер і терміну їх відкриття при знятті шлаку.

Метою роботи є подальше підвищення енергетичної ефективності та удосконалення конструкції стаціонарних печей для переплавки алюмінієвого брухту, яка реалізується наступними науково-технічними заходами:

1 Для модернізованої конструкції печі, в якій в боковій стінці замість однієї форкамери розміром $4 \times 1 \text{ м}^2$ розміщені 2 форкамери розмірами по $2 \times 1 \text{ м}^2$ і терміном відкриття форкамер – 30 хв. кожна здійснити заміну теплоізоляційних шарів: повністю замінити азбестовий картон на мінеральну вату, також у деяких випадках зменшити товщину пінодіатомита і збільшити товщину силікату кальція.

2 При змінній конструкції теплоізоляційних шарів розрахувати втрати теплоти зовнішніми огороженнями модернізованої печі, на основі енергетичного балансу визначити термін плавки при електричному та газовому нагріву.

3 Розробити удосконалену конструкцію печі з нахиленим склепінням, для якої визначити термін плавки та інші енергетичні показники.

4 Виконати оцінку енергетичної та економічної ефективності перевodu печі місткістю 6 т з електричного на газовий нагрів, підібрати відповідні пальники для спалювання природного газу, передбачити утилізацію теплоти димових газів для нагріву дуттьового повітря.

5 Методом математичного моделювання в Solid Works визначити розподіл температур в огороженнях печі.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	10
1 Температурно-теплові режими роботи міксерів і печей для переплавки алюмінієвого брухту (літературний огляд)	12
1.1 Конструкції печей (міксерів) для переплавки алюмінієвого брухту.....	12
1.2 Теплові умови роботи печей для переплавки алюмінієвого брухту	20
1.3 Конструктивні, теплові і енергетичні характеристики базової конструкції печі місткістю 6 т [5].....	21
1.4 Постановка задачі і програма досліджень.....	25
2 Підвищення енергетичної ефективності печей для переплавки алюмінієвого брухту	27
2.1 Результати розрахунків енергоефективності печі при зміні теплоізоляції.....	27
2.2 Удосконалена конструкція печі.....	42
2.3 Висновки до розділу 2	45
3 Газовий нагрів печі для переплавки алюмінієвого брухту	48
3.1 Розрахунки та вибір газових пальників.....	48
3.2 Оцінка ефективності переведення печі з електричного на газовий нагрів.....	51
3.3 Утилізація теплоти димових газів печі.....	52
Висновки до розділу 3	63
4 Математичне моделювання температурних полів в стінках печі	64
4.1 Постановка задачі.....	64
4.2 Геометричне моделювання.....	65
4.3 Порівняння результатів отриманих в програмі розробленою НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» з результатами Flow Simulation 2014	72
4.4 Висновки до розділу 4	73
5 Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях.....	76
5.1 Технічні та організаційні рішення щодо робочих місць в приміщенні науково-дослідної лабораторії.....	76
5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з гігієни праці та виробничої санітарії при виконанні науково-дослідної роботи	81
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях	85
5.4 Висновки до розділу 5	88
6 Розроблення стартап-проекту	89
6.1 Опис блоків бізнес-моделі.....	89

6.2 Висновки до розділу 6	92
Висновки	94
Список використаної літератури.....	97
Додаток А	99
Додаток Б.....	101
Додаток В.....	102
Додаток Г	104

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Q – потужність, кількість теплоти, тепловий потік;

- термін;

m – маса;

c_p – питома ізобарна теплоємність;

t – температура;

h – висота, ентальпія;

- коефіцієнт надлишку повітря;

q – густина теплового потоку, втрати теплоти;

P – потужність;

Q_{p_n} – нижча теплота згоряння;

- густина;

- температура;

- ККД;

q_v – корисна теплова напруга;

q_o – питома теплова характеристика;

E – витрата електроенергії.

Індекси верхні:

тв. – твердий;

р – розплав;

зовн. – зовнішній;

Індекси нижні:

нагр. – нагрів;

пл. – плавлення;

перегр. – перегрів;

ф.в. – відкриті форкамери;

о – отвори;

ф.з. – закриті форкамери;

р – розплав;

п – поверхня; втрати; паз; приведена;

д – дійсний;

вст. – встановлена;

ух – гази, що відходять;

кор. – корисний;

втр. – втрати;

в.п. – використання палива;

ал. – алюміній;

зн – зовнішній;

скл. – склепіння;

под. – подина;

л – лиття;

ц – цикл.

Скорочення

К – корунд;

ПШ – порошок шамотний;

Ш – шамот;

ПД – пінодіатоміт;

В – вермикуліт;

А – азбестовий картон;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина.

1 ТЕМПЕРАТУРНО-ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ РОБОТИ МІКСЕРІВ І ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВКИ АЛЮМІНІЄВОГО БРУХТУ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

Виробництво кольорових металів постійно зростає, що пов'язано із збільшенням потреби в них. Однак виробництво кольорових металів із рудного матеріалу пов'язано з постійно зростаючими затратами внаслідок погіршення гірничо-геологічних умов розробки родовищ, зниження вмісту металів у рудах, збільшення витрат на паливо, енергію і захист навколишнього середовища. Витрати на паливо та енергію зростають не тільки із-за збільшення в ряді випадків їх кількісного використання, але і через підвищення цін на них.

Метали і сплави, отримані із вторинної сировини мають більшу питому вагу в загальному об'ємі виробництва і споживання кольорових металів. Виробництво вторинних кольорових металів, в тому числі алюмінію є достатньо ефективним, оскільки витрати сировини і матеріалів на їх виготовлення значно нижчі чим на випуск первинних металів. Крім того, в більшості випадків технологія вторинного металу екологічно більш чиста. В цьому випадку практично повністю виключені викиди в атмосферу таких шкідливих з'єднань, як фторид водню і смолисті речовини, які мають місце при виробництві первинного алюмінію.

Технологічні пристрої призначені для проведення технологічних процесів при нагріванні матеріалів до температури необхідної для отримання металів і сплавів з необхідними властивостями називаються металургійними печами. Печі можуть працювати на двох видах обігріву: електричному та полум'яному. Для отримання алюмінієвих сплавів із вторинної сировини використовуються печі різних конструкцій, основні відомості про яких наведені нижче.

1.1 Конструкції печей (міксерів) для переплавки алюмінієвого брухту

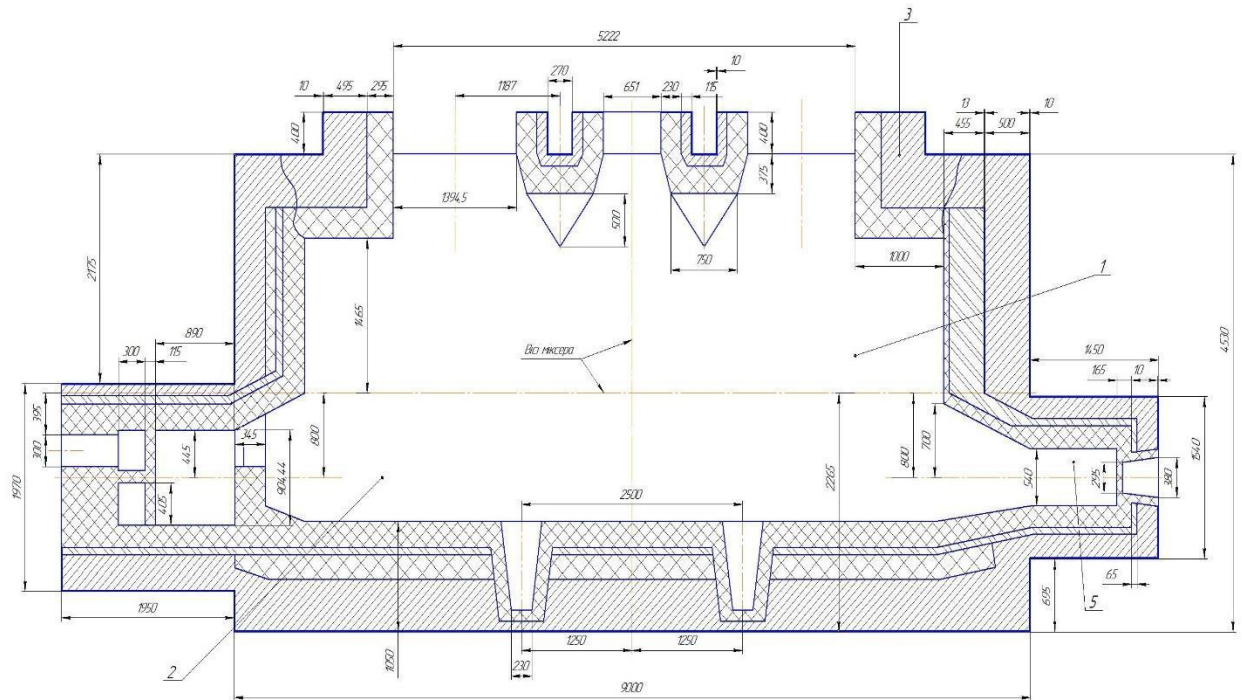
Стационарні печі для переплавки алюмінієвого брухту, які використовуються на алюмінієвих заводах з завершеним технологічним циклом (рис.1.1), є високотемпературними теплотехнологічними агрегатами періодичної дії.

Робочий простір печі виконано у вигляді прямокутної камери, футеровка якої розміщена в металевому кожусі. Камера має дві зони: нижню 1, де знаходиться розплав і верхню 2 – без розплаву.

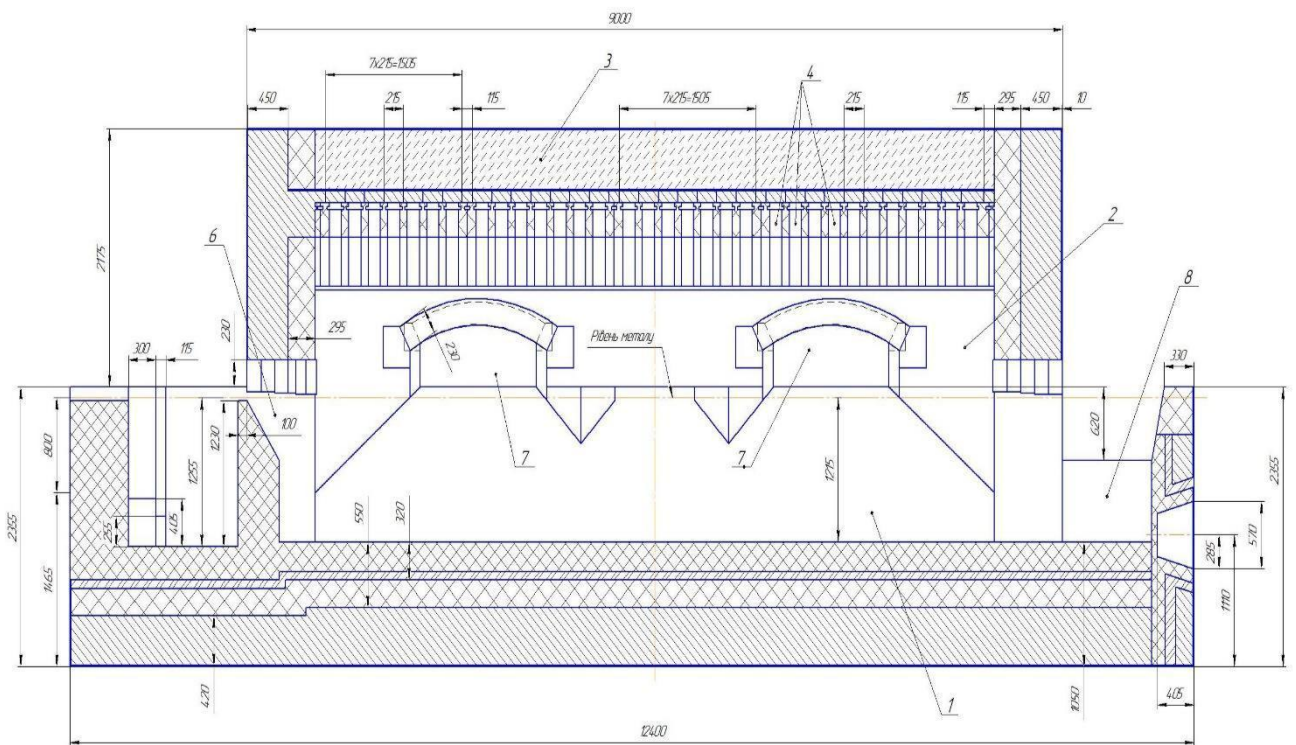
Футеровку міксерів виконують багатошаровою. Перший шар – вогнетривкий, який для подовження складається послідовно із шамоту високоглиноземного і шамоту звичайного, для бокових стінок нижньої зони – із шамоту високоглиноземного, для бокових стінок верхньої зони – із шамоту звичайного. Після вогнетривкого шару для деяких поверхонь, що знаходяться в зоні розплаву, розміщається засипка з порошку шамотного.

Верхня частина камери закрита арковим не з'ємним склепінням 3. Склепіння виконують із фасонної шамотної цегли, зверху якої знаходиться теплоізоляція із пінодіатоміту, азбесту і

а) поздовжній переріз



б) поперечний переріз



1 – нижня зона, 2 – верхня зона, 3 – склепіння, 4 – нагрівальні елементи, 5 – заливний карман,
6 – переливні льотки, 7 – льотки для лиття, 8 - форкамери

Рисунок 1.1 – Типова конструкція печі для переплавки алюмінієвого брухту

вермикуліту (табл. 1.1). В пазах цегляного склепіння встановлюють стрічкові або дровотві зигзагоподібні нагрівальні елементи 4, виготовлені із ніхрому Х20Н80 або із сталі 0Х27Ю5А.

Таблиця 1.1 – Характеристика футеровочно-теплоізоляційних матеріалів печі

Найменування огороження	Матеріали/товщини шарів (мм)				
	1	2	3	4	5
Подина	$\frac{\text{К}}{230}$	$\frac{\text{П}}{\frac{\text{Ш}}{70}}$	$\frac{\text{Ш}}{230}$	$\frac{\text{П}}{\frac{\text{Д}}{490}}$	$\frac{\text{А}}{10}$
Склепіння	$\frac{\text{Ш}}{6}$ 5	$\frac{\text{ПД}}{390}$	$\frac{\text{А}}{13}$	$\frac{\text{В}}{500}$	$\frac{\text{А}}{10}$
Бокова задня стінка в розплаві	$\frac{\text{К}}{250}$	$\frac{\text{П}}{\frac{\text{Ш}}{50}}$	$\frac{\text{Ш}}{230}$	$\frac{\text{П}}{\frac{\text{Д}}{460}}$	$\frac{\text{А}}{10}$
Торцюва стінка в розплаві	$\frac{\text{К}}{250}$	$\frac{\text{П}}{\frac{\text{Ш}}{80}}$	$\frac{\text{Ш}}{115}$	$\frac{\text{П}}{\frac{\text{Д}}{345}}$	$\frac{\text{А}}{10}$
Торцюва стінка вище розплаву	$\frac{\text{Ш}}{295}$	$\frac{\text{ПД}}{495}$	$\frac{\text{А}}{10}$	-	-
Бокові стінки вище розплаву	$\frac{\text{Ш}}{295}$	$\frac{\text{ПД}}{450}$	$\frac{\text{А}}{10}$	-	-

Умовні позначення матеріалів:

К – корунд; Ш – шамот; ПШ – піношамот; ПД – пінодіатоміт;

В – вермикуліт; А – азбест.

Нагрівачі живляться від мережі змінного струму напругою 380 В. При стаціонарному склепінні їх заміна здійснюється через верхню частину однієї з бокових стін печі.

До конструктивних елементів печі також відносять заливний карман 5, переливні льотки 6, льотки для лиття виробів 7, форкамери 8, що закриваються футерованими з внутрішньої сторони засувками.

Піч встановлюють на підлозі цеху або фундаменті, виконаному із бетонних блоків або сталевих балок.

Спочатку через відкриті форкамери в міксер загрузають алюмінієвий брухт, потім включають зовнішні нагрівальні пристрої і здійснюють нагрів і розплавлення твердого матеріалу, а потім доведення розплавленого металу до необхідної температури, після чого через форкамери видаляють з робочого об'єму сталеві та інші домішки і здійснюють лиття виробів.

Для розплавлення твердого алюмінію та підтримання необхідної температури розплаву в міксері застосовують необхідні нагрівальні пристрої (електричні нагрівачі, газові або рідкопаливні пальники).

Після повного закінчення лиття алюмінію цикл повторюється.

Ефективність роботи міксерів багато в чому залежить від температурних і теплових факторів протікання технологічного процесу, умов роботи футеровки та теплоізоляції.

Футеровка міксерів, а особливо її перший шар, який знаходиться в контакті з розплавом, в процесі терміну експлуатації руйнується за рахунок хімічної, фізичної і механічної взаємодії. Хімічна взаємодія обумовлена тим, що при контакті високоагресивного розплаву алюмінію з першим шаром футеровки останній розчиняється. Цей процес супроводжується руйнуванням футеровки і забрудненням розплаву шлаковими включеннями. Фізична взаємодія пов'язана з просочуванням футеровки розплавом по тріщинах і порах та її руйнування за рахунок різниці в коефіцієнтах лінійного розширення металу та вогнетривкого матеріалу при коливаннях температури. Механічна взаємодія спостерігається при ударах алюмінієвого брухту в процесі його завантаження в робочий простір печі.

Стійкість футеровки визначається в основному хімічною взаємодією, інтенсивність якої залежить від властивостей вогнетривкого матеріалу (вміст в ньому глинозему) і розплавленого металу [1].

Аналіз деяких досліджень [1 - 4] показує, що з метою підвищення стійкості футеровки і збільшення терміну експлуатації міксера її необхідно виконувати з вогнетривких матеріалів зі вмістом оксиду алюмінію більше як 85 %. Такі вогнетривкі матеріали погано змочуються алюмінієм. Також для футеровки міксерів можливо застосовувати магнезитові або корундові вогнетривкі матеріали, а також виготовляти футеровку міксерів з оксидів, вільна енергія утворення яких більша, ніж у глинозему (наприклад, ZrO_2 , MgO , CaO).

При використанні високоглиноземистих, корундових, магнезитових і інших високостійких в агресивному середовищі вогнетривких матеріалів необхідно враховувати техніко-економічні показники, які пов'язані з вартістю цих матеріалів і передбачуванім збільшенням терміну експлуатації міксерів при їх застосуванні порівняно з традиційними вогнетривкими матеріалами.

Заходи щодо підвищення стійкості футеровки не виключають, врешті решт, її просочування розплавом, тому що цей процес визначається температурою матеріалу і, як вказувалося вище, просочуванням розплаву через пори, тріщини в цеглі і шви між ними. Просочування розплавом футеровки призводить до зміни її теплофізичних властивостей, зокрема до підвищення теплопровідності матеріалів і, як наслідок, до збільшення втрат теплоти з зовнішніх поверхонь міксера.

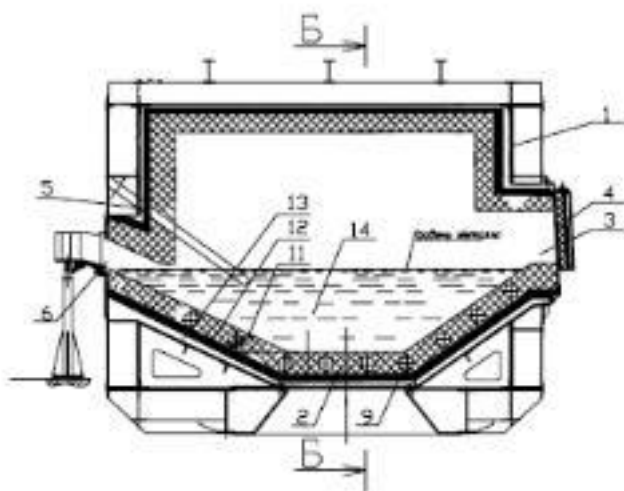
Окрім футеровочних шарів, в міксерах застосовують і теплоізоляцію, основна мета якої є зменшення теплових втрат через зовнішні обгородження та підтримання температури зовнішніх поверхонь не вище за 60 С (що регламентується санітарними нормами).

В роботі [2] запропонована нова конструкція печі. До уваги прийнятий фактор підвищення теплової ефективності нагріву брухту за рахунок використання прямої теплопередачі між

нагрівачами, встановленими у вогнетривкому шарі футеровки подици ванни і розплаву, а також шляхом збільшення конвективної теплопередачі в самому металі, що знаходиться у ванній печі.

Поставлена задача вирішується тим, що в печі на електричному обігріві, що містить металевий каркас, футеровану ванну, робоче вікно з дверима, термоелектричний термометр для вимірювання температури металу, летку, заливний-переливний карман з кришкою, нагрівачі встановлені у вогнетривкому шарі футеровки подици ванни і захищені розплавостійким високотеплопровідним кожухом.

Електричні печі (міксери), представлені на рисунках 1.2 і 1.3, мають металевий каркас 1, футеровану ванну 2, робоче вікно 3 з дверима 4, термоелектричний термометр для вимірювання 5 температури металу, летку 6, заливний-переливний карман 7 з кришкою 8, нагрівачі 9, захищені розплавостійкими кожухами 10, вогнетривкий шар 11, буферний шар 12, теплозахисний шар 13 футеровки ванни 2, розплав 14.



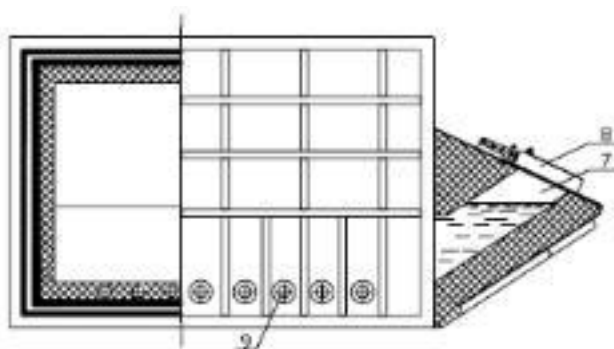
1 – металевий каркас; 2 – футерована ванна; 3 – робоче вікно; 4 – двері робочого вікна; 5 – термоелектричний термометр; 6 – летка; 9 – нагрівачі; 10 – розплавостійкий кожух; 11 – вогнетривкий шар; 12 – буферний шар; 13 – теплозахисний шар; 14 – розплав Рисунок 1.2 –

Поворотний електричний міксер з нагрівачами у футеровці подици

Стационарний електричний міксер з нагрівачами, розташованими у футеровці подици паралельно фронтальній стороні, показаний на рис. 1.3.

При подачі напруги на нагрівальні елементи нагрівачів 9 відбувається їх розігрів і розігрів розплавостійких кожухів 10 нагрівачів 9 до необхідної температури, наприклад, 800°C . Нагрівачі встановлені у вогнетривкому шарі 11 футеровки ванни 2, яка за рахунок прямої теплопередачі від розплавостійкого високотеплопровідного кожуха 10 нагрівача 9 також розігрівається і на кордоні «футеровка-розплав» досягає необхідної величини, наприклад, 750°C .

За рахунок інтенсивного конвективного теплообміну повітря в робочому просторі печі, прямій теплопередачі і нагріву випромінюванням, температура футеровки бічних стін 2 ванни та



7 – залівний-переливний карман; 8 – кришка; 9 – нагрівачі;

Рисунок 1.3 – Стационарний електричний міксер з нагрівачами у футеровці подини

склепіння досягає необхідних температур.

При температурі повітряного середовища у робочому просторі електропечі 745°C , температурі брукту 750°C і температурі нагрівачів 800°C , температурний перепад у вогнетривкому шарі 11 футеровки при відстані 100 мм від розігрітого нагрівача 9 до межі «футеровка-розплав» досягає в установленому режимі близько 50°C .

За рахунок високої теплопровідності розплаву металу рідкого алюмінію, температура на поверхні дзеркала металу при висоті стовпа металу 1100 мм складе близько 742°C (без урахування конвективного теплообміну). У разі врахування конвективного теплообміну між розігрітим нижнім шаром розплаву металу і менш розігрітим верхнім шаром металевого розплаву, перепад температур по висоті стовпа металу буде ще меншим.

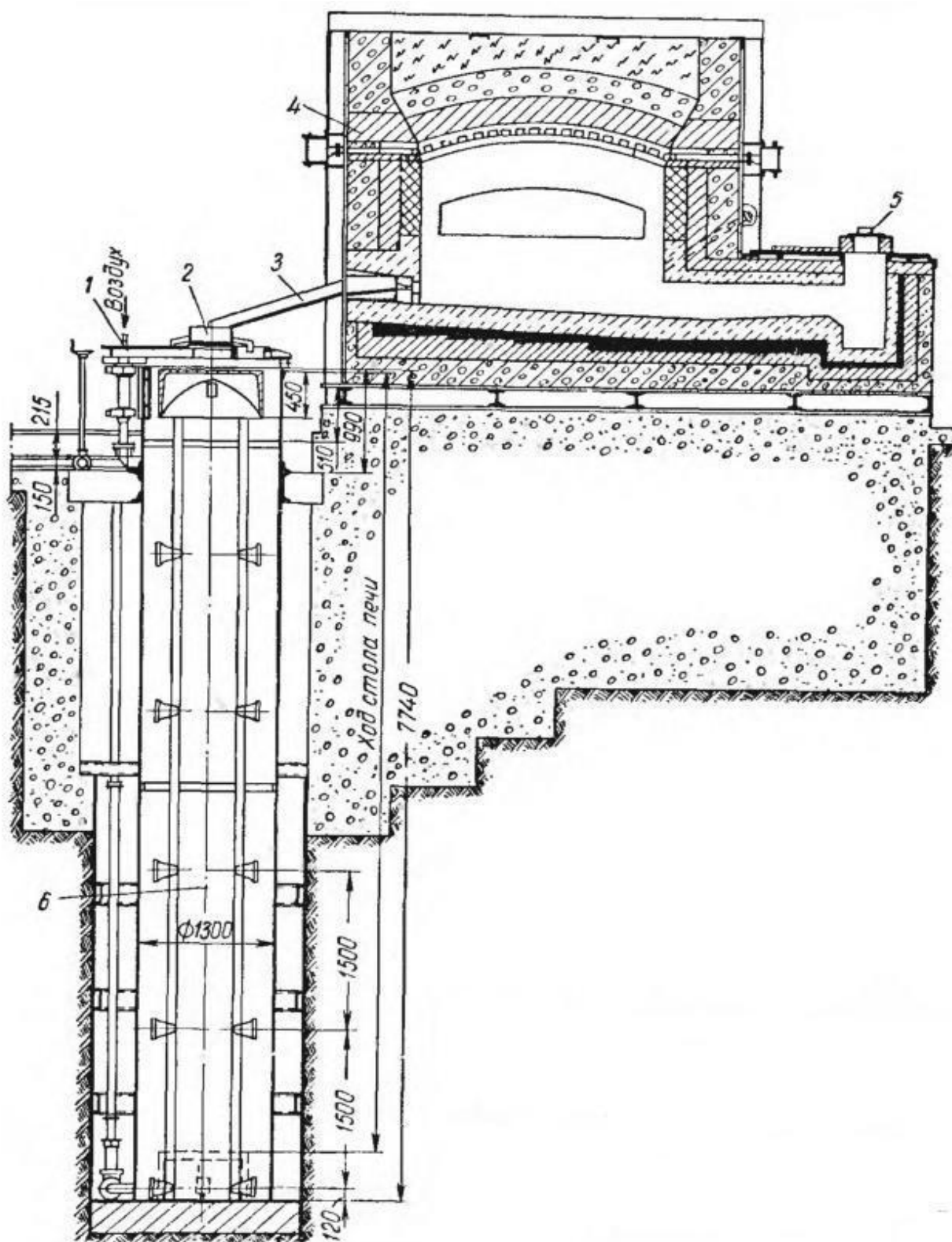
В роботі [3] піч для переплавки алюмінієвого брукту представляє собою здвоєну стаціонарну піч опору загальною ємністю 30 т алюмінію (рис. 1.4).

Нагрівальні елементи печі розташовані в склепінні і мають вигляд стрічки з поперечним перерізом 4x40 мм із сплаву X20H80. Нагрівачі кожної камери розбиті на три фази потужністю по 100 кВт кожна та підключені за схемою «зірка» в трьохфазну мережу змінного струму 380/220 В. Температура нагрівачів 1050°C . Розплавлений алюміній після очистки в ківшах заливають в піч через отвори 5. Розлив алюмінію відбувається періодично через випускную летку і жолоб 3. Рідкий алюміній попадає в розподіляючу чашу із якої потім розтікається по кристалізаторам.

Затверділі злитки із кристалізаторів витягають в колодязь 6 з допомогою механізму підйому та опускання. Розлив ведуть почергово, то з однієї суміжної камери міксера, то з іншої. В другій камері в цей час алюміній готують до розливу. Температура металу в печі $675 - 800^{\circ}\text{C}$. Продуктивність однієї установки при відливі алюмінієвих злитків довжиною 7 м при швидкості лиття 200 мм/хв складає 110 т/добу. Витрата електроенергії для обігріву міксера 43 кВт·год/т.

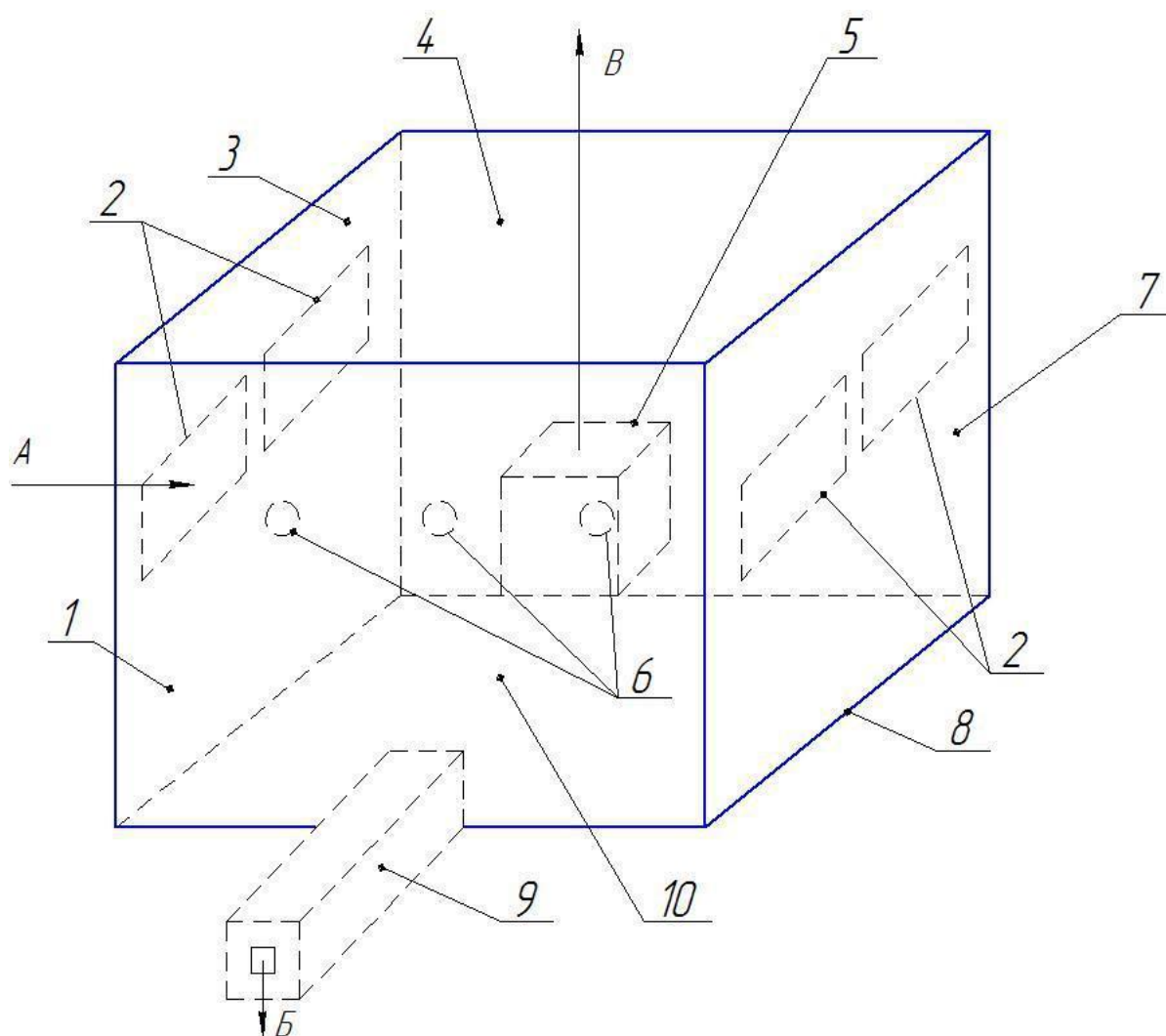
В роботі [4] представлений роздаточний міксер ємністю 25 т з газовим обігрівом (рис. 1.5).

В якості першого футерованого шару всіх огорожуючих поверхонь використаний вогнетривкий шамот класу А товщиною 230 мм в склепінні і подині, 345 мм в бокових і торцевих



1 – рама з кристалізаторами; 2 – розподілюча чаша; 3 – жолоб; 4 – електричний міксер; 5 – отвір для заливання розплавленого алюмінію; 6 – колодязь для витягування злитків

Рисунок 1.4 – Установка напівбезперервного лиття алюмінію з електричним двокамерним міксером опору загальною ємністю 30 т



1 – торцюва ліва стінка; 2 – форкамери; 3 – склепіння; 4 – бокова задня стінка; 5 – газохід; 6 – пальники; 7 – торцюва права стінка; 8 – подина; 9 – карман для лиття алюмінію; 10 – бокова передня стінка; А – заливка металу; Б – виливка металу; В – вихід димових газів

Рисунок 1.5 – Спрощена конструкція роздаточного міксер

стінках; другим шаром футеровки (тільки в подині) є «шамот-легковес» товщиною 200 мм.

Для теплоізоляції огорожень використаний пінодіатоміт, товщина якого в горизонтальній подині становить 185 мм, в нахилений – 660 мм, в бокових і торцевих стінках – 65 мм, в склепінні – 113 мм.

Для вирівнювання поверхні слугують глиноземна і діатомітова засипки, остання використана і для теплоізоляції склепіння. Крім цього, внутрішню поверхню кожуха міксеру викладають листовим азбестом товщиною 10 мм.

У відповідності до технології алюміній-сирець надходить в електролізні корпуси в ковшах, в них зважується і відстоюється протягом 15 хв. Потім з поверхні алюмінію знімається шлак і вміст ковшів виливається або в міксер-копильник, або безпосередньо в роздаточний міксер.

Після заливки з ковшів в роздаточний міксер чергової порції металу проходить його відстоювання не менше 15 хв, знімається шлак і створюється покривний шар при подачі карналітового флюсу. Після відливки кожної партії злитків процедура повторюється у відповідності описаному вище. Футеровані шари, що знаходяться в зоні розплаву повністю або частково просочуються алюмінієм, а теплоізоляційні просочуються частково або не просочуються взагалі.

1.2 Теплові умови роботи печей для переплавки алюмінієвого брухту

Ефективність роботи міксерів багато в чому залежить від температурних і теплових факторів протікання технологічного процесу, умов роботи футеровки та теплоізоляції.

Футеровка міксерів, а особливо її перший шар, який знаходиться в контакті з розплавом, в процесі терміну експлуатації руйнується за рахунок хімічної, фізичної і механічної взаємодії. Хімічна взаємодія обумовлена тим, що при контакті високоагресивного розплаву алюмінію з першим шаром футеровки останній розчиняється. Цей процес супроводжується руйнуванням футеровки і забрудненням розплаву шлаковими включеннями. Фізична взаємодія пов'язана з просочуванням футеровки розплавом по тріщинах і порах та її руйнування за рахунок різниці в коефіцієнтах лінійного розширення металу та вогнетривкого матеріалу при коливаннях температури. Механічна взаємодія спостерігається при ударах алюмінієвого брухту в процесі його завантаження в робочий простір печі.

Стійкість футеровки визначається в основному хімічною взаємодією, інтенсивність якої залежить від властивостей вогнетривкого матеріалу (вміст в ньому глинозему) і розплавленого металу [1].

Аналіз деяких досліджень [1 - 4] показує, що з метою підвищення стійкості футеровки і збільшення терміну експлуатації міксера її необхідно виконувати з вогнетривких матеріалів зі вмістом оксиду алюмінію більше як 85 %. Такі вогнетривкі матеріали погано змочуються алюмінієм. Також для футеровки міксерів можливо застосовувати магнезитові або корундові вогнетривкі матеріали, а також виготовляти футеровку міксерів з оксидів, вільна енергія утворення яких більша, ніж у глинозему (наприклад, ZrO_2 , MgO , CaO).

При використанні високоглиноземистих, корундових, магнезитових і інших високостійких в агресивному середовищі вогнетривких матеріалів необхідно враховувати техніко-економічні показники, які пов'язані з вартістю цих матеріалів і передбачуванім збільшенням терміну експлуатації міксерів при їх застосуванні порівняно з традиційними вогнетривкими матеріалами.

Заходи щодо підвищення стійкості футеровки не виключають, врешті рещт, її просочування розплавом, тому що цей процес визначається температурою матеріалу і, як вказувалося вище, просочуванням розплаву через пори, тріщини в цеглі і шви між ними. Просочування розплавом

футеровки призводить до зміни її теплофізичних властивостей, зокрема до підвищення теплопровідності матеріалів і, як наслідок, до збільшення втрат теплоти з зовнішніх поверхонь міксера.

Окрім футеровочних шарів, в міксерах застосовують і теплоізоляцію, основна мета якої є зменшення теплових втрат через зовнішні огороження та підтримання температури зовнішніх поверхонь не вище за 60 С (що регламентується санітарними нормами).

Важливий вплив на енергетичну ефективність роботи печі має місце розташування нагрівачів. Розташування нагрівачів під склепінням електричної печі в класичному виконанні, багато в чому обумовлено специфічною конструкцією останніх (відкриті, підвісні стрічкові нагрівачі) та низькою надійністю футеровочних матеріалів подины печі. Щодо ефективності така конструкція електричної печі має суттєві недоліки: збільшений обсяг внутрішнього простору із-за розташування нагрівачів; збільшені теплові втрати; перегрів нагрівачів і робочого простору печі; нагрівання розплаву в робочому просторі відбувається тільки за допомогою одного виду теплопередачі – випромінюванням, що призводить до перегріву верхніх шарів розплаву металу і охолодження нижніх шарів, і потребує вирівнювання температури розплаву шляхом зовнішнього впливу, наприклад, перемішуванням, і т. ін.

На даний момент якість футеровочних матеріалів досягла нового рівня: вони витримують високі температури; можуть мати низькі значення теплопровідності і електропровідності; витримують значні механічні навантаження при високих температурах. Конструкція нагрівачів також зазнала значних змін: при наявності нових електротехнічних і електроізоляційних матеріалів нагрівачі стали більш захищеними від зовнішнього середовища за допомогою захисних кожухів; мають більший термін служби.

1.3 Конструктивні, теплові і енергетичні характеристики базової конструкції печі місткістю 6 т [5]

Для базової конструкції печі (див. рис. 1.1 і табл. 1.1) в НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» КПП імені Ігоря Сікорського були виконані розрахунки теплових втрат зовнішніми огороженнями (табл. 1.2), порівняльні показники теплового стану поверхонь печі при наявній і змінній конструкціях футеровки (табл. 1.3) та варіантні розрахунки енергобалансів (вихідні дані -табл. 1.4, результати розрахунків – табл.1.5).

Аналіз отриманих результатів з теплового стану поверхонь огорожень показує, що, наприклад, при застосуванні силікату кальцію для теплоізоляції замість пінодіатоміту температури зовнішніх поверхонь на 16 – 26 % нижче, ніж у міксера наявної конструкції, а теплові втрати – на 28 – 45 % (середня величина біля 37 %).

Таблиця 1.2 – Результати розрахунків теплових втрат зовнішніми огороженнями міксера

Найменування огороження	Тепловідда- вальна поверхня $F, \text{м}^2$	Густина теплогового потоку $q, \text{Вт/м}^2$	Теплові втрати, $Q_{\text{тi}}^{\text{зовн}}, \text{кВт}$
1 Подина	70,3	255	17,926
2 Склепіння	72,7	188	13,668
3 Бокова задня стінка в розплаві	3,6	272	0,979
4 Торцьова стінка в розплаві	1,4	353	0,494
5 Торцьова стінка вище рівня розплаву	18,4	250	4,600
6 Бокова передня стінка вище розплаву	10,2	271	2,764
7 Бокова задня стінка вище розплаву	11,7	271	3,171
Теоретичні теплові втрати	188,3	-	43,6
8 Закриті форкамери	4,0	1065	4,26
9 Сталеві листи	5,92	3675	21,756
Сумарні теплові втрати зовнішніми обгородженнями	198,22	-	91,4
<p>Примітка Фактичні сумарні теплові втрати визначали за формулою</p> $Q_{\text{п}}^{\text{зовн}} = k Q_{\text{тi}}^{\text{зовн}} + Q_{\text{ф.з}} + Q_{\text{ст}},$ <p>де k – коефіцієнт збільшення реальних теплових втрат порівняно з розрахунковими (приймається 1,5); $Q_{\text{тi}}^{\text{зовн}}$ - теоретичні теплові втрати окремими обгородженнями, кВт; $Q_{\text{ф.з}}$ і $Q_{\text{ст}}$ – втрати теплоти через закриті форкамери та сталеві листи, що закривають струмопідводи, кВт.</p>			

З урахуванням інших елементів міксера (закриті форкамери, сталеві листи в районі розміщення нагрівачів), де діатоміт в наявних конструкціях не використовувався, тобто і не відбувалась його заміна, теплові втрати через зовнішні поверхні міксера місткістю 6 т в цілому зменшуються на 26 %.

За розробленою програмою в НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» КПІ імені Ігоря Сікорського були виконані варіантні розрахунки енергобалансів та визначені терміни плавки алюмінієвого брухту при заданій встановленій потужності печі для наступних варіантів:

- варіант 1 – базовий (міксер наявної конструкції);
- варіант 2 – міксер зміненої конструкції (порівняно з варіантом 1 застосована теплоізоляція із силікату кальція);
- варіант 3 – міксер зміненої конструкції (на відміну від варіанту 2 зменшений термін відкриття форкамер для зняття шлаку);

Таблиця 1.3 – Порівняльні показники теплового стану поверхонь печі

Найменування обгородження	Наявна конструкція футеровки		Змінена конструкція футеровки		Зміна в %	
	$t_{\text{зовн}}$, С	Q , кВт	$t_{\text{зовн}}$, С	Q , кВт	$t_{\text{зовн}}$	Q
1 Подина	48	17,93	40	10,51	-16,7	-41,5
2 Склепіння	50	13,69	37	9,86	-26,0	-28,0
3 Бокова задня стінка в розплаві	49	0,98	41	0,59	-16,3	-39,8
4 Торцьова стінка в розплаві	54	0,50	43	0,26	-20,4	-48
5 Бокові стінки вище розплаву	48	5,94	40	3,83	-16,7	-43,9
6 Торцьова стінка вище розплаву	49	4,60	39	2,55	-20,4	-44,6
Теоретичні теплові втрати	-	43,64	-	27,6	-	-36,8
7 Закриті форкамери	-	4,26	-	4,26	-	0
8 Сталеві листи	-	21,76	-	21,76	-	0
Сумарні теплові втрати зовнішніми обгородженнями	-	91,4	-	67,4	-	-26,3

- варіант 4 – міксер зміненої конструкції (на відміну від варіанту 2 змінена кількість та розміри форкамер).

Так, для варіанту 2 при застосуванні теплоізоляції із силікату кальцію замість пінодіатоміту порівняно з варіантом 1 сумарні теплові втрати зменшені на 112,8 кВт год (або на 7,5 %) за рахунок їх зменшення через подину, бокові і торцьові стінки. Теплові втрати через відкриті форкамери та отвори практично не змінилися. Термін плавки алюмінію зменшився на 12 хв.

Таким чином, найбільший внесок в загальні теплові втрати поверхнями міксера для варіантів 2 і 1 складають втрати теплоти через відкриті форкамери при знятті шлаку, що дорівнюють більше як 1000 кВт.

Для варіанту 3 (заміна теплоізоляції і зменшенні терміну відкриття форкамери площею $F = 4 \text{ м}^2$ з 60 до 45 хв.) термін плавки порівняно з варіантом 1 зменшується на 42 хв. або на 13 %. Сумарні теплові втрати зменшились на 406 кВт або на 27 % в порівнянні з варіантом 1.

Для варіанту 4 (заміна теплоізоляції, застосування двох форкамер площею по 2 м^2 та терміном їх відкриття по 30 хв. кожна) термін плавки зменшився на 1 год 12 хв. або на 24 %. Сумарні теплові втрати поверхнями міксера зменшились на 695 кВт або на 46 % в порівнянні з варіантом 1.

Таблиця 1.4 – Вихідні дані до розрахунків енергобалансів

Показник	Значення показника для варіантів			
	1	2	3	4
Маса брухту, що загружається, кг	6000	6000	6000	6000
Температура брухту, С	25	25	25	25
Температура повітря в цеху, С	25	25	25	25
Маса алюмінію, що виливається, кг	5000	5000	5000	5000
Робоча температура розплаву, С	750	750	750	750
Кількість форкамер, шт.	1	1	1	2
Розміри форкамери: ширина, м висота, м	4	4	4	2
	1	1	1	1
Кількість отворів, шт.	1	1	1	1
Розміри отвору: ширина, м висота, м	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,13	0,13	0,13	0,13
Товщина стінки в районі отвору, м	0,81	0,81	0,81	0,81
Термін відкритих форкамер при знятті шлаку, хв.	60	60	45	по 30 хв. кожна
Сумарні теплові втрати зовнішніми обгородженнями, кВт	91,4	72,75	72,75	72,75
Довжина міксера (внутрішня частина), м	7,4	7,4	7,4	7,4
Ширина міксера (внутрішня частина), м	3,44	3,44	3,44	3,44
Напруга живильної мережі, В	380	380	380	380
Температура нагрівача, С	1000	1000	1000	1000
Встановлена потужність печі, кВт	600	600	600	600

Результати наведених варіантних розрахунків свідчать про те, що найбільш суттєвий ефект, пов'язаний з економією витрат електроенергії для плавки алюмінію, може бути досягнутий зі зменшенням теплових втрат через відкриті форкамери (зменшенні їх площі та терміну відкриття при знятті шлаку).

Таким чином, підсумком енергозберігаючих заходів, що отримані в роботі [5], є:

1) при застосуванні силікату кальцію для теплоізоляції замість пінодіатоміту температура зовнішніх поверхонь на 16 – 26 % нижча, ніж у міксера наявної конструкції, а теплові втрати – на 28 – 45 %;

2) економію витрат електроенергії для плавки алюмінію можливо досягнути зі зменшенням

Таблиця 1.5 – Результати розрахунків енергобалансів міксера для переплавки алюмінієвого брухту

Статті балансу	Значення величин для варіантів			
	1	2	3	4
1 Витрати теплоти на нагрів алюмінієвого брухту, кДж	3,26 10^6			
2 Витрати теплоти на розплавлення брухту, кДж	1,94 10^6			
3 Витрати теплоти на перегрів розплаву алюмінію, кДж	0,574 10^6			
4 Втрати теплоти через зовнішні огороження, кВт	91,4	72,75	72,75	72,75
5 Втрати теплоти через форкамери:				
- відкриті, кВт	258			
- закриті, кВт	4,3			
6 Втрати теплоти через отвори, кВт	1,2			
7 Втрати теплоти на нагрів повітря, кВт	754			
8 Термін плавки алюмінію, год	5,2	5,0	4,5	4,0

теплових втрат через відкриті форкамери (зменшення їх площі по терміну відкриття при знятті шлаку);

3) порівняльні розрахунки електричних нагрівачів показали, що при використанні стрічкових зигзагоподібних можна досягти більшу встановлену потужність порівняно з проволочними спіральними за рахунок більш високого коефіцієнта ефективності;

4) при застосуванні сталі ЕИ-626 для виготовлення нагрівачів встановлена потужність міксера для переплавки алюмінієвого брухту може бути збільшена приблизно в 2 рази порівняно з ніхромом.

1.4 Постановка задачі і програма досліджень

В зв'язку зі створенням нових футеровочних матеріалів та збільшенням екологічних вимог для виробництва якісних алюмінієвих виробів до технологічних можливостей основного та додаткового обладнання ставлять все більш високі вимоги. Основними напрямками подальшого розвитку алюмінієвого виробництва є підвищення комплексного використання перероблюваної сировини (брухту) в процесі виробництва алюмінію, використання нових прогресивних енергозберігаючих технологій.

Ефективність роботи печей для переплавки алюмінієвого брухту багато в чому залежить від температурних і теплових факторів протікання технологічного процесу, умов роботи футеровки та теплоізоляції.

Мета роботи полягає в тому, щоб розробити найбільш ефективну конструкцію печі для переплавки алюмінієвого брухту, яка б характеризувалась підвищеним терміном експлуатації, зменшеними втратами в навколишнє середовище та зменшеними питомими витратами енергії, що підводиться, зменшеним терміном плавки алюмінієвого брухту.

Програма досліджень:

- 1) Розрахунок теплових втрат через зовнішні обгородження печі.
- 2) Вибір футерувально-теплоізоляційних матеріалів та їх товщини.
- 3) Оцінка енергетичної та економічної ефективності перевodu печі для переплавки алюмінієвого брухту з електричного на газовий обігрів.
- 4) Розрахунки по створенню більш ефективної конструкції печі.
- 5) Розробка конструкції рекуператора для утилізації теплоти димових газів.
- 6) Математичне моделювання температурних полів по товщині зовнішніх обгороджень конструкції печі.
- 7) Охорона праці.
- 8) Розробка стартап проекту.

2 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВКИ АЛЮМІНІЄВОГО БРУХТУ

В продовження роботи [5] для печі місткістю 6 т, що використовується для переплавки алюмінієвого брухту, розроблені заходи з подальшого підвищення її енергетичної ефективності та удосконалення конструкції.

Окрім модернізації конструкції печі, в якій в боковій стінці замість однієї форкамери розміром $4 \times 1 \text{ м}^2$ розміщені 2 форкамери розмірами по $2 \times 1 \text{ м}^2$ і терміном відкриття форкамер – 30 хв кожна, що розглянуто в роботі [5], здійснена зміна теплоізоляційних шарів: повністю замінений азбестовий картон на мінеральну вату, також у деяких випадках зменшена товщина пінодіатомита і збільшена товщина силікату кальція (див. табл. 2.1).

2.1 Результати розрахунків енергоефективності печі при зміні теплоізоляції

Для визначеної або заданої потужності печі ($P_{\text{вст}}$, кВт) термін плавки (включає нагрів брухту до температури розплавлення, розплавлення і перегрів розплаву алюмінію до робочої температури), год, визначається з рівняння енергетичного балансу, тобто

$$\frac{\overset{\circ}{\text{нагр}} \quad \overset{\circ}{\text{пл}} \quad \overset{\circ}{\text{перегр}} \quad \overset{\circ}{\text{ф.в}} \quad \overset{\circ}{\text{ф.з}} \quad \overset{\circ}{\text{ф.п}} \quad \overset{\text{ш}}{\text{в}}}{(P_{\text{вст}} \quad Q_{\text{зовн}} \quad Q_{\text{от}}) \cdot 3600}, \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{нагр}}$, $Q_{\text{пл}}$, $Q_{\text{перегр}}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрів брухту до температури розплавлення, його розплавлення, перегрів розплавленого алюмінію та твердих домішок до робочої температури, відповідно, кДж;

$Q_{\text{ф.в}}$, $Q_{\text{ф.з}}$, - втрати теплоти через відкриті форкамери, через зовнішні поверхні закритих форкамер, відповідно, кВт;

$Q_{\text{ф.п}}$ - витрати теплоти на нагрівання повітря, що всмоктується в робочий простір печі при відкритті форкамер, кВт;

ш - термін відкриття форкамер в періоді плавки для зняття шлаку, с; в

$Q_{\text{зовн}}$ - втрати теплоти через зовнішні огороження печі (бокові і торцеві стінки, подину, склепіння), $Q_{\text{от}}$ - втрати теплоти через отвори, кВт.

Кількість теплоти, що витрачається на нагрів алюмінієвого брухту до температури розплавлення – $Q_{\text{нагр}}$, кДж

$$Q_{\text{нагр}} = m C_p^{\text{ТВ}} (t_{\text{пл}} - t_{\text{поч}}), \quad (2.2)$$

де m – маса алюмінієвого брухту, що загрузається в міксер, кг;

$C_p^{\text{ТВ}}$ - теплоємність твердого алюмінію, кДж/(кг К) (за літературними даними $C_p^{\text{ТВ}} = 0,86$

кДж/(кг К));

$t_{пл}$ – температура розплавлення алюмінію, С ($t_{пл} = 656$ С);

$t_{поч}$ – початкова температура брухту, що завантажується, С.

Кількість теплоти, що витрачається на розплавлення алюмінію – $Q_{пл}$, кДж

$$Q_{пл} = m_1 r_{пл}, \quad (2.3)$$

де m_1 – маса алюмінію, що виливається з печі, кг (за практичними даними величина m_1 складає біля 80 – 86 %, а в середньому 83 % від маси брухту, що завантажується в піч, тобто $m_1 = 0,83 m$); $r_{пл}$ – теплота розплавлення алюмінію, кДж/кг (за літературними даними $r_{пл} = 388$ кДж/кг).

Кількість теплоти, що витрачається на перегрів алюмінію до робочої температури, а також твердих домішок до цієї ж температури – $Q_{перегр}$, кДж

$$Q_{перегр} = m_1 (t_p - t_{пл}) c_p + (m - m_1) (t_p - t_{пл}) c_p, \quad (2.4)$$

де t_p – температура алюмінію, що виливається, С (за технологічними даними $t_p = 730 - 750$ С);
 c_p – теплоємність розплавленого алюмінію, кДж/(кг К) (за літературними даними $c_p = 1,05$ кДж/(кг К) при температурі розплавлення).

кДж/(кг К) при температурі розплавлення).

Втрати теплоти через зовнішню поверхню закритої форкамери, кВт

$$Q_{ф.з.} = q_{ф.з.} F_{ф.} 10^3, \quad (2.5)$$

де $q_{ф.з.}$ – густина теплового потоку, Вт/м²; $F_{ф.}$ – поверхня заслінки форкамери, м².

Величина $q_{ф.з.}$ визначається з табл. 2.2 [5] в залежності від температури поверхні заслінки $t_{п}$

$$t_{п} = 0,5[(t_{н} - 50) + t_p].$$

Втрати теплоти через відкриті форкамери і отвори $Q_{ф.в.}$; Q_o , кВт

а) через форкамери

$$Q_{ф.в.} = C_o \Phi F_{ф.в.} \frac{T_{ф.}^4}{100} - \frac{T_{нав.}^4}{100} 10^3, \quad (2.6)$$

де C_o – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, що дорівнює 5,67 Вт/(м² К⁴);
 Φ – коефіцієнт діафрагмування;

$F_{ф.в.}$ – теплопередавальна поверхня відкритих форкамер, м²;

$T_{ф.}$ – абсолютна температура робочого простору в районі розміщення форкамер, К;

$T_{нав.}$ – абсолютна температура навколишнього повітря, К.

Коефіцієнт діафрагмування

$$\Phi = 0,5(1 + \mu_2), \quad (2.7)$$

де μ_2 – кутовий коефіцієнт випромінювання, який визначають із співвідношення

$$L_{1,2} = L / (L + \dots), \quad (2.8)$$

де L – ефективна товщина шару, що випромінює, м;

- товщина стінки, м (для конструкції печі, що розглядається, величина з урахуванням виступу форкамери дорівнює 1,24 м).

При заданих розмірах форкамери a b ефективну товщину шару, що випромінює, визначають за формулою

$$L = 2ab / [ab + b + a] \quad (2.9)$$

Температура робочого простору в районі розміщення форкамер, К

а) при знятті шлаку

$$T_{\Phi} = \frac{t_{\text{н}} + 50 + t_{\text{р}} + 273}{2} \quad (2.10)$$

б) через отвори

$$Q_{\Phi} = C_{\Phi} F_{\Phi} \left(\frac{T_{\text{о}}}{100} \right)^4 - \frac{T_{\text{нав}}}{100} \cdot 10^3, \quad (2.11)$$

де F_{Φ} – теплопередавальна поверхня отворів, м²;

$T_{\text{о}}$ – абсолютна температура робочого простору в районі отворів, К.

Для конструкції міксера, що розглядається, отвір квадратної форми розміщений в склепінні, тому $F_{\Phi} = a \cdot b$, м², а $T_{\text{о}} = (t_{\text{н}} - 50) + 273$, К.

Коефіцієнт діафрагмування визначають за формулою (2.7), при цьому (для отвору круглої форми) – величину α – за формулою (2.8), а величину L – за формулою (2.9).

Якщо отвір розташований в боковій стінці, то температура в його районі $T_{\text{о}} = [(t_{\text{н}} - 50) + t_{\text{р}}]/2 + 273$.

При отворах круглої форми діаметром d_{Φ} , м, величина $F_{\Phi} d_{\Phi}^2 / 4$, а ефективна товщина шару, що випромінює,

$$L = \frac{d_{\Phi}^2}{d_{\text{ст}}^2 + 4d_{\Phi}^2}, \quad (2.12)$$

де $d_{\text{ст}}$ – товщина бокової стінки або склепіння, м.

Витрати теплоти на нагрів повітря, що всмоктується в робочий простір міксера при відкритті форкамер – Q_{Φ} , кВт

$$Q_{\Phi} = 0,2c(t_{\Phi} - t_{\text{нав}})a \cdot b, \quad (2.13)$$

де c – питома об'ємна теплоємність повітря, кДж/(м³ К), визначається в залежності від середньої температури повітря, що нагрівається, тобто $t_{\text{п}} = 0,5(t_{\Phi} + t_{\text{н}})$, за [5] при цьому

$$t_{\text{ф}} = \frac{0,5 (t_{\text{в}} - 50) t_{\text{п}}}{2} + t_{\text{в}}.$$

Втрати теплоти через зовнішні огороження – $Q_{\text{п}}^{\text{зовн}}$, Вт.

Вони розраховуються для кожної конкретної стінки з урахуванням її геометричних розмірів, температур в робочому просторі печі і навколишнього повітря, матеріалів і товщин футеровки і теплоізоляції.

Нижче наведена методика конструкторського розрахунку огорожень печі і теплових втрат зовнішніми поверхнями в навколишнє середовище, яка враховує просочування футеровки і теплоізоляції розплавом і відповідну зміну теплопровідності футеровочно-теплоізоляційних матеріалів. Для розрахунку втрат теплоти через зовнішні огороження використана комп'ютерна програма, що розроблена фахівцями НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Спрощена блок-схема розрахунку наведена на рис. 2.1.

Опис блок-схеми

Символ 1. Початок.

Символ 2. Ввод вихідних даних:

вид тепло передавальної поверхні (бокова, подина, склепіння); кількість шарів; матеріали шарів (вибираються з списку можливих);
висота (тільки для бокової стінки) $h_{\text{ст}}$,
м; робоча температура в міксері $t_{\text{р.в.}}$, С.

температура навколишнього повітря $t_{\text{нав.}}$, С;

поверхня огороження F , м²;

температура зовнішньої поверхні $t_{\text{зовн.}}$, С;

наявність контакту з розплавом (є/немає);

похибка розрахунків, %;

бажана товщина обгородження b , м.

Символ 3. Коефіцієнт тепловіддачі 2 від зовнішньої поверхні розраховується за рекомендованою в [6] формулою

$$\alpha_2 = \alpha_0 + \alpha_1 (t_{\text{зовн.}} - 30) + \alpha_2 (t_{\text{зовн.}} - 30)^2 + \alpha_3 (t_{\text{зовн.}} - 30)^3, \quad (2.14)$$

яка справедлива для $t_{\text{н+1}} = 30 - 210$ С.

Постійні коефіцієнти α_0 , α_1 , α_2 і α_3 в залежності від типу теплопередавальної поверхні наведені в [6].

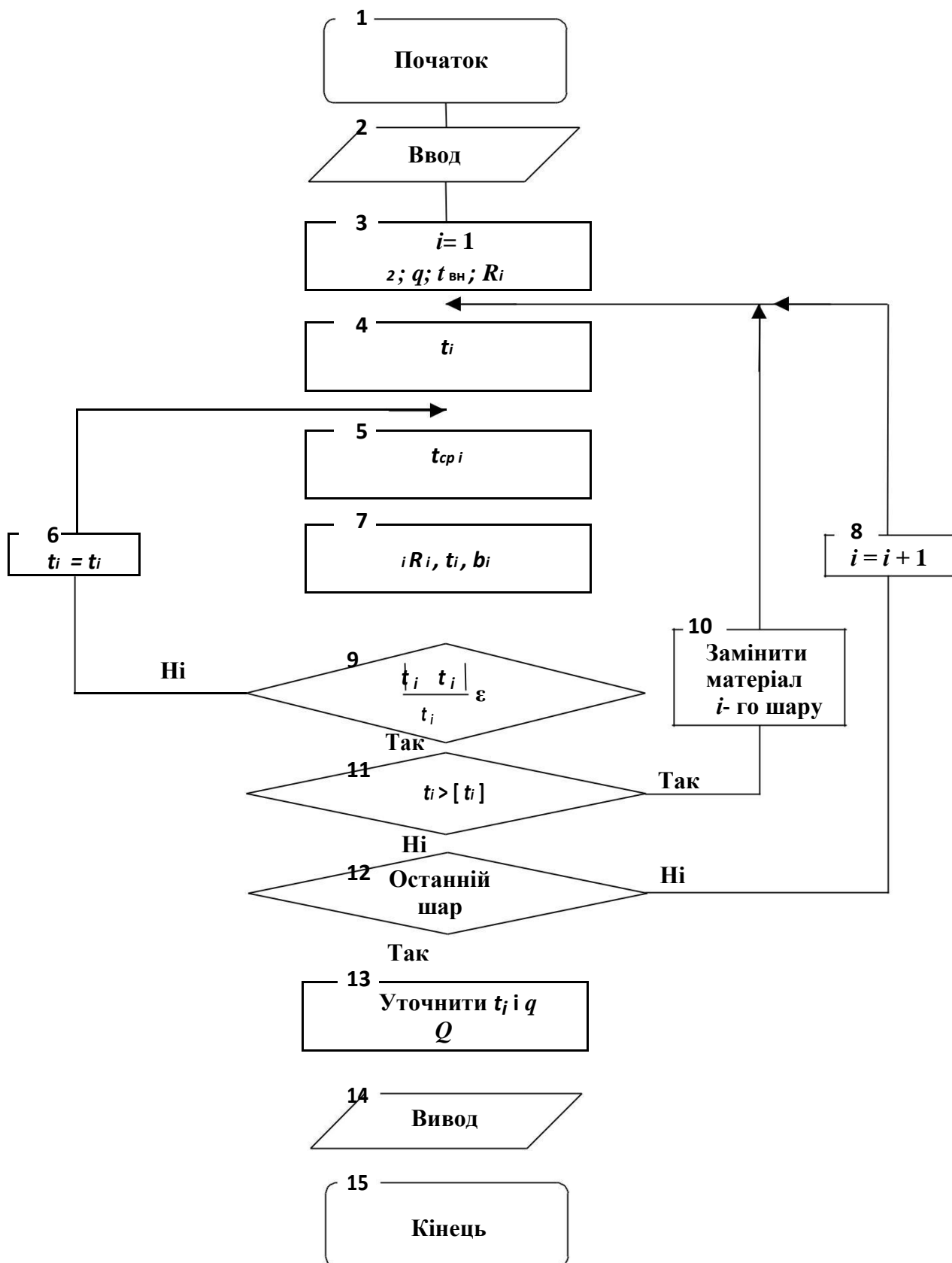


Рисунок 2.1 – Блок-схема конструкторського розрахунку обгороджень печі

Потім розраховується поверхнева густина теплового потоку, Вт/м^2 , з рівняння тепловіддачі

$$q = 2 (t_{\text{зовн}} - t_{\text{нав.}}) \quad (2.15)$$

Визначається температура внутрішньої поверхні:

$$\text{для бокової стінки і подини } t_{\text{вн}} = t_{\text{р.в.}} + q \frac{1}{\alpha_1};$$

$$\text{для склепіння } t_{\text{вн}} = t_{\text{р.в.}} + q \frac{1}{\alpha_1};$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі до внутрішніх поверхонь [для тих, що знаходяться в розплаві – 500 Вт/(м² К) і вище рівня розплаву – 50 Вт/(м² К)].

Сумарний термічний опір теплопровідності стінки

$$R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}}{q} \quad (2.16)$$

Символ 4. Приймається в першому наближенні температура межі i -го шару з $(i + 1)$ – м:

$$t_i = t_{i-1} + 40 \frac{t_{\text{вн}} - t_{i-1}}{40} \quad (\text{між першим та другим шаром } i-1 \text{ вн}).$$

Символ 5. Визначається середня температура шару футеровки або теплоізоляції

$$t_{\text{ср}} = 0,5 t_{i-1} + t_i \quad (2.17)$$

Символ 6. Приймається $t_i = t_{i-1}$.

Символ 7. Розраховується величина теплопровідності матеріалу шару в залежності від середньої температури і просочування алюмінієм, тобто $\lambda_i = B_i t_{\text{ср}}$, де A_i і B_i – постійні коефіцієнти, які залежать від виду матеріалу і ступеня його просочування [1]; а також приблизно

визначається термічний опір шару $R_i = \frac{t_i - t_{i-1}}{q}$, потім товщина шару $b_i = \frac{R_i}{\lambda_i}$, визначається його

стандартне значення $b_i^{\text{ст}}$, потім розраховується термічний опір теплопровідності $R_i = \frac{b_i^{\text{ст}}}{\lambda_i}$ і дійсна температура на межі шарів $t_i = t_{i-1} + q R_i$.

Символ 8. Перехід до розрахунку наступного шару ($i = i + 1$).

Символ 9. Умова для виходу з циклу ітерацій: якщо розрахована на даній ітерації температура відрізняється від попередньої більш як на 2 %, то розрахунок повторюється знову.

Символ 10. Користувачу пропонується змінити матеріал i -го шару і повторити розрахунок.

Символ 11. Перевірка на перевищення максимально допустимої температури для матеріала ($i + 1$)-го шару.

Символ 12. Якщо шар не останній, то необхідно перейти до розрахунку наступного шару.

Символ 13. Уточнення густини теплового потоку і перерахунок температур на межах шарів. Густина теплового потоку

$$q = \frac{t_{\text{п.в}} - t_{\text{навк.}}}{\frac{1}{b_i}} \quad (2.18)$$

1 i 2

Температури на межах шарів розраховуються так як в символі 7, але для раніше заданих величин $b_i^{\text{ст}}$. Втрати теплоти через поверхню $Q = q F$.

Символ 14. Вивід результатів розрахунків на екран і, при необхідності, на принтер.

Символ 15. Кінець.

Втрати теплоти через сталеві листи, що закривають струмопідводи електронагрівачів в бокових стінках

$$Q_{\text{ст}} = q_{\text{ст}} F_{\text{ст}} \quad (2.19)$$

де $q_{\text{ст}}$ – густина теплового потоку, Вт/м²;

$F_{\text{ст}}$ – тепло передавальна поверхня листів, м².

Величину $q_{\text{ст}}$ можна розрахувати за методикою для одношарової сталевий стінки товщиною $b_{\text{ст}} = 10$ мм при відомій температурі $t_{\text{ст}}$, яка на основі практичних вимірів може бути прийнятою 200 С. Крім цього, необхідно прийняти температуру зовнішнього повітря $t_{\text{навк}}$.

На рисунках 2.2-2.7 наведені розподіли температур по зовнішнім огороженням печі, в таблиці 2.1 результати розрахунків теплових втрат, а в таблиці 2.2 – вихідні дані і результати розрахунків енергобалансу печі.

Розрахунки теплових втрат виконані для двох варіантів нагріву: електричний, газовий.

Для печі наявної конструкції величина втрат теплоти через зовнішні огороження становлять 91,4 кВт при електричному нагріву і 72,1 кВт при газовому.

Варто відмітити, що при газовому нагріві теплові втрати огороженнями модернізованої печі зменшуються на 40 % порівняно з електричним. Пояснюється це тим, що при газовому нагріві відсутні сталеві листи, що закривають струмовідводи при електричному нагріві.

В результаті розрахунків за формулою (2.1) отримані наступні значення терміну плавки:

- електричний нагрів – 3,92 год;

- газовий нагрів – 3,78 год.

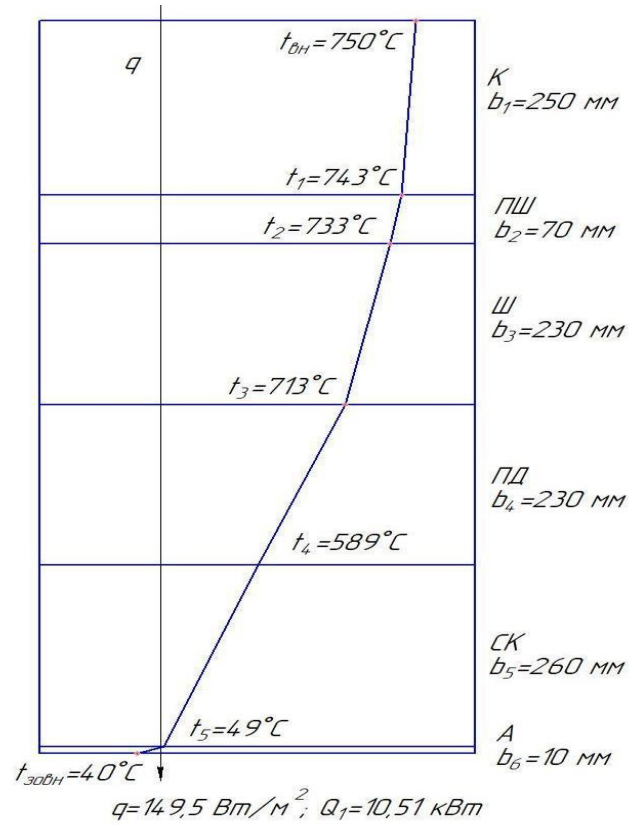
Витрати теплоти на компенсацію втрат огороженнями печі, кВт·год, визначали за формулою

$$Q_{\text{в.т}} = Q_{\text{втр.і}} \cdot i$$

де $Q_{\text{втр.і}}$ – дійсні втрати теплоти через окремі огороження, кВт; i – термін плавки, год.

Результати розрахунків (табл. 2.3) витрат теплоти на компенсацію втрат огороженнями показують, що при електричному нагріві і встановленій потужності печі 600 кВт для

а) наявна конструкція



б) змінена конструкція

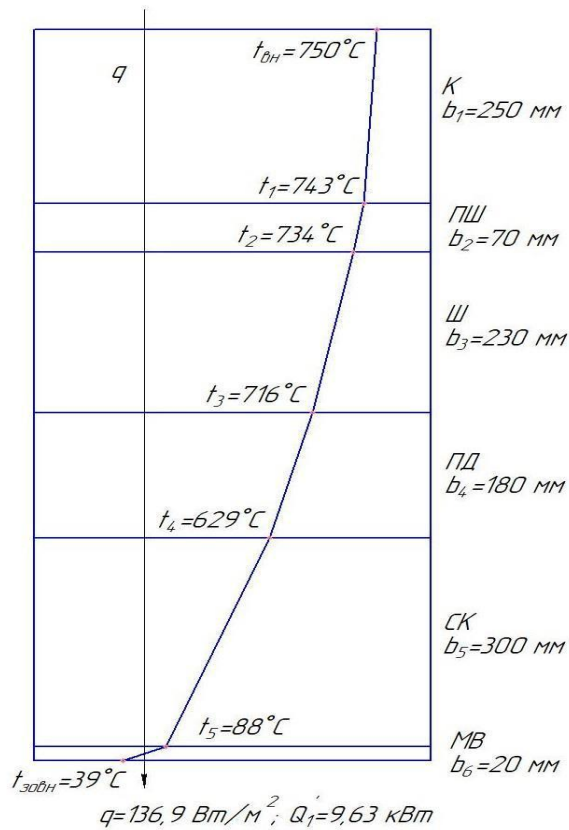
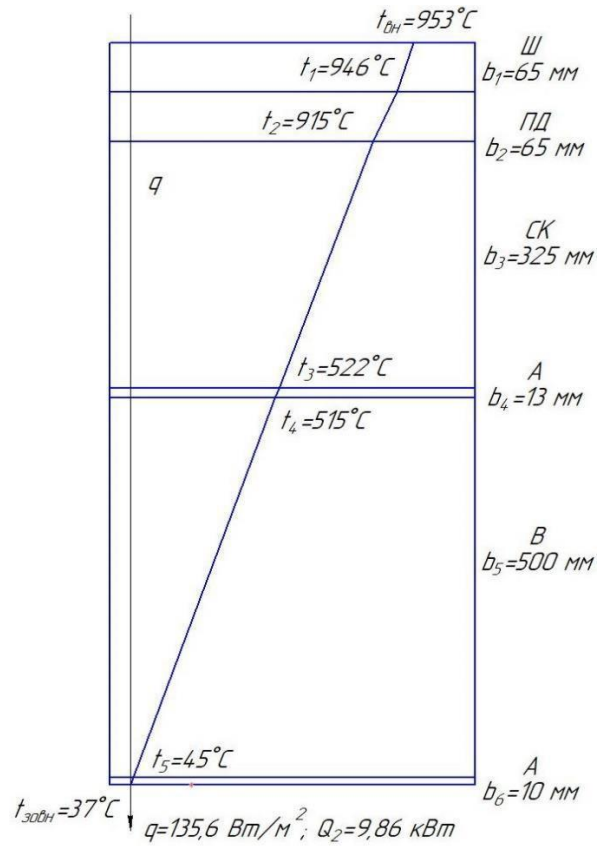


Рисунок 2.2 – Розподіл температур по товщині подины

а) наявна конструкція



б) змінена конструкція

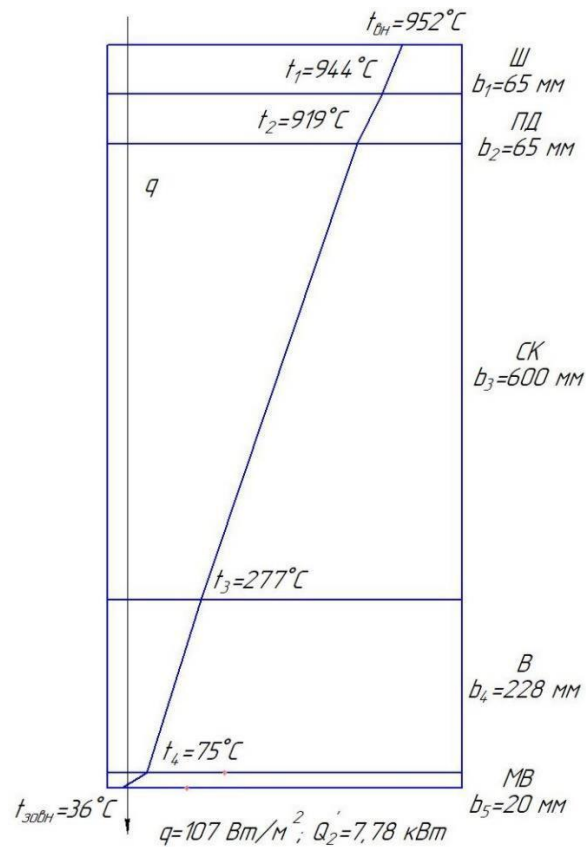
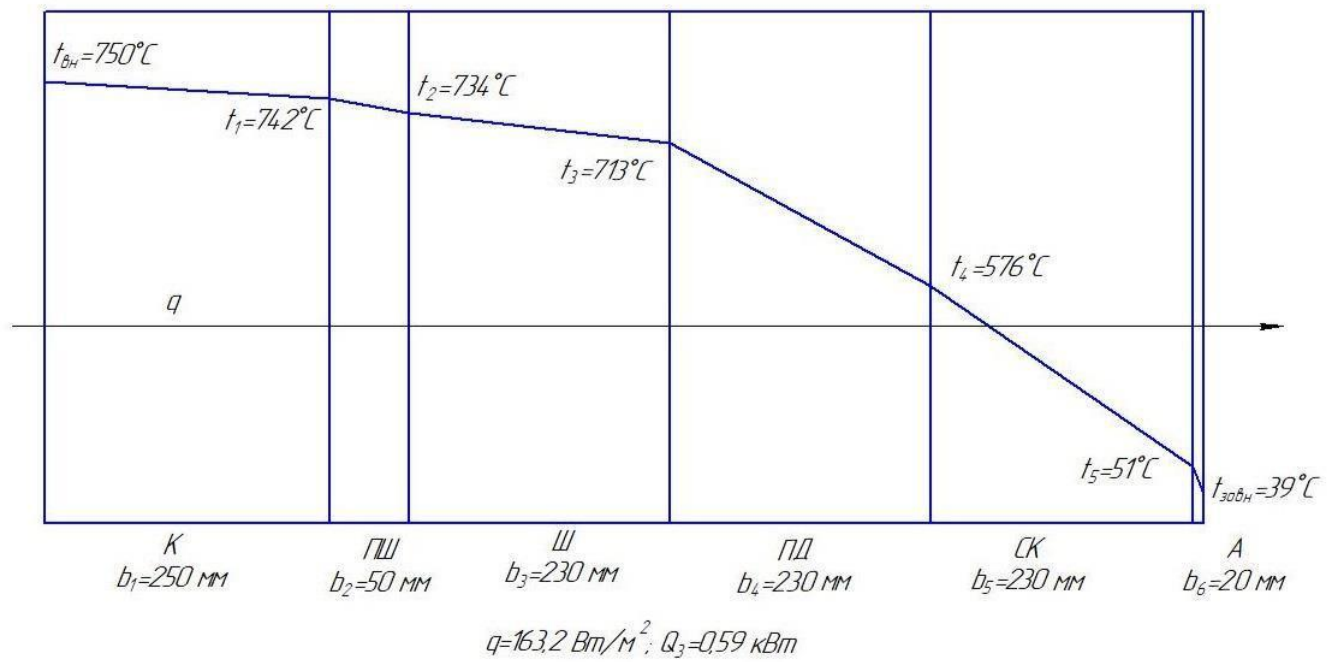


Рисунок 2.3 – Розподіл температур по товщині склепіння

а) наявна конструкція



б) змінена конструкція

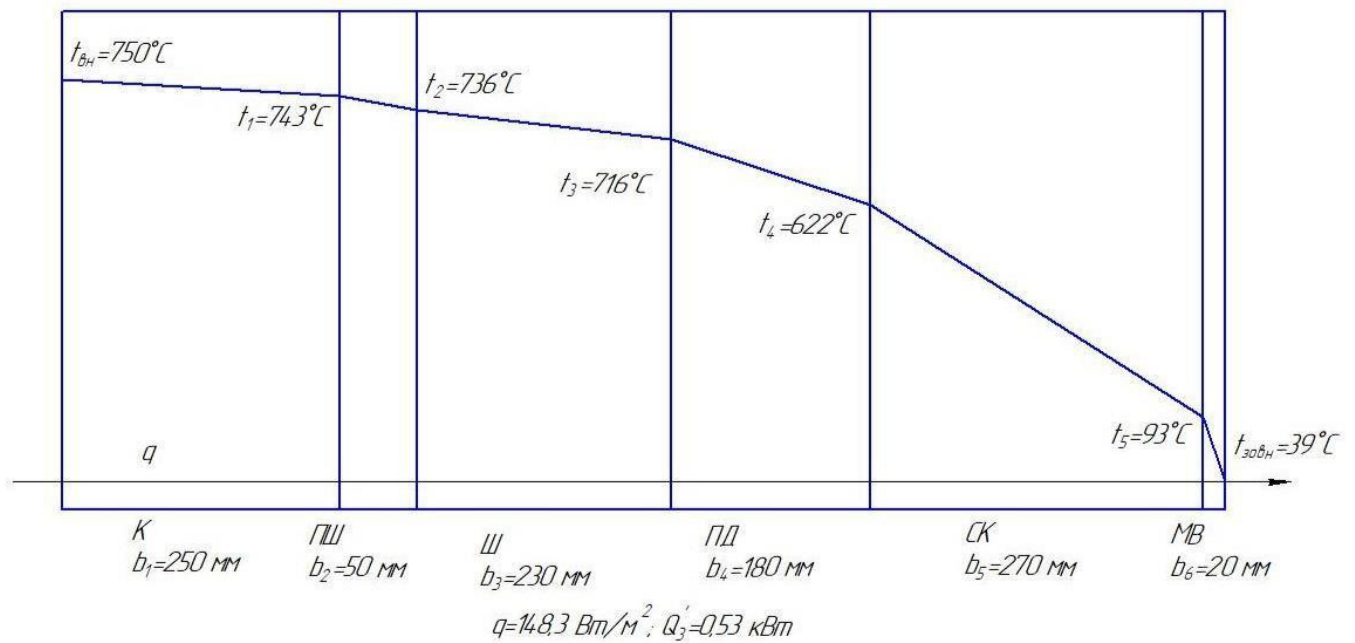
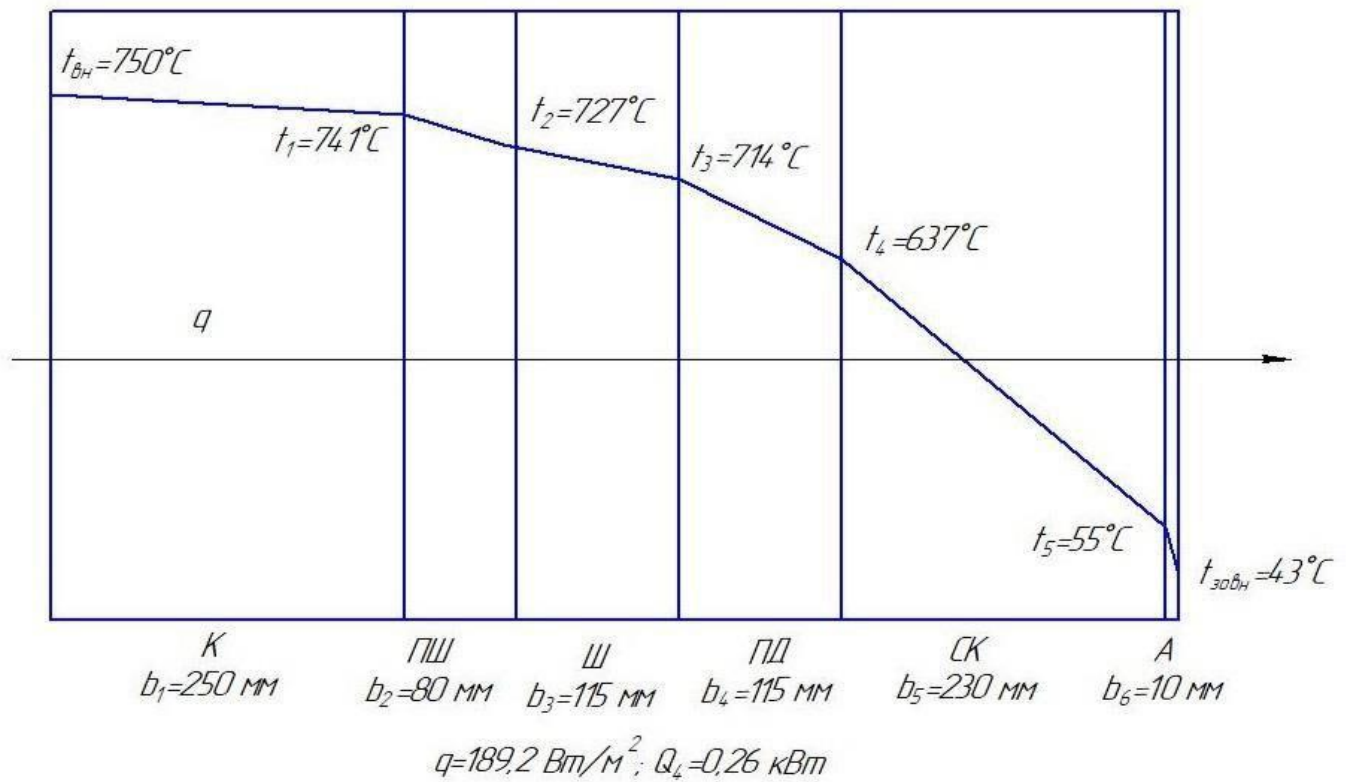


Рисунок 2.4 – Розподіл температур по товщині бокової задньої стінки, що знаходиться в розплаві

а) наявна конструкція



б) змінена конструкція

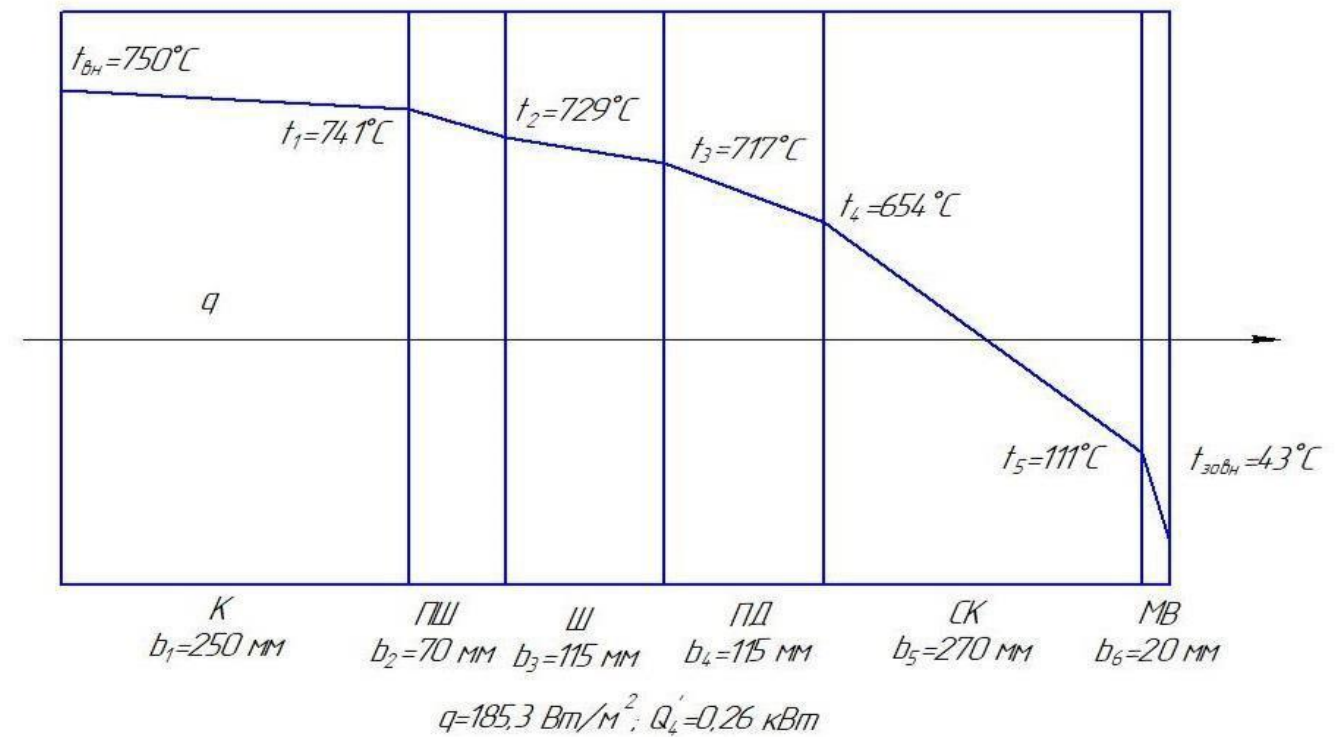
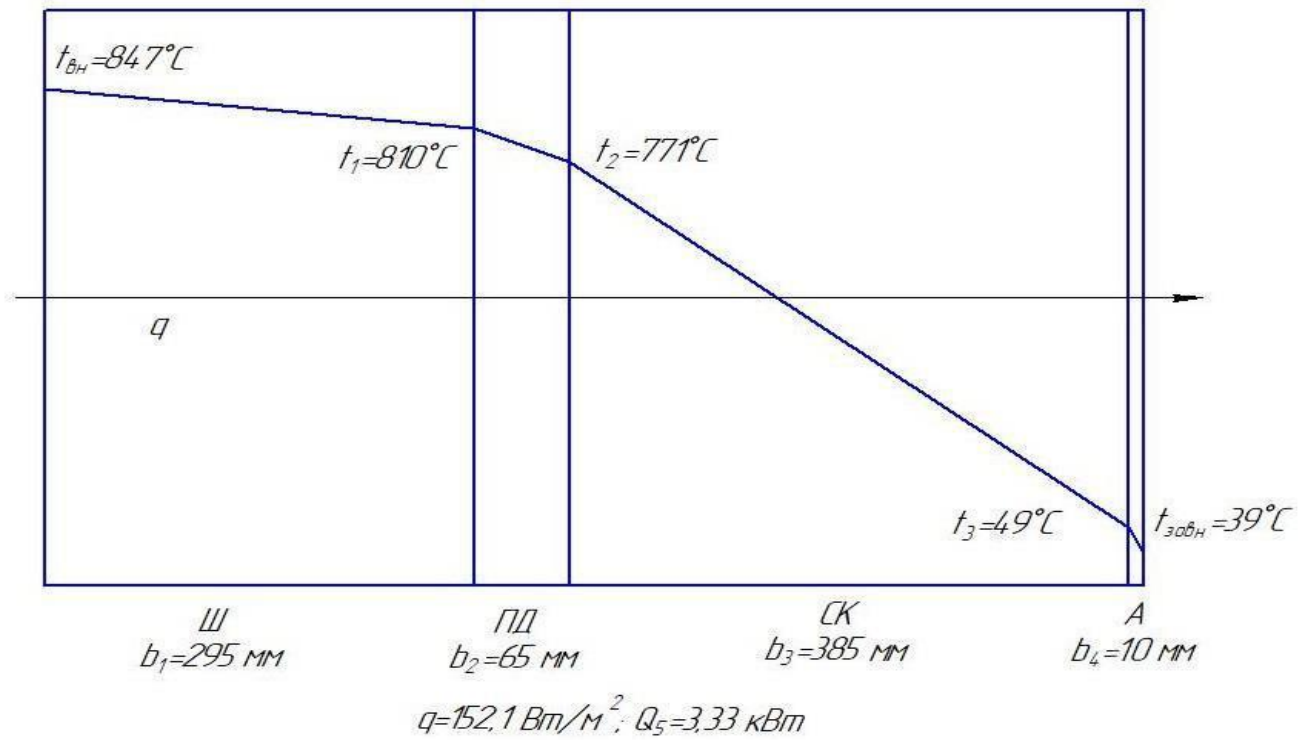


Рисунок 2.5 – Розподіл температур по товщині торцьової стінки, що знаходиться в розплаві

а) наявна конструкція



б) змінена конструкція

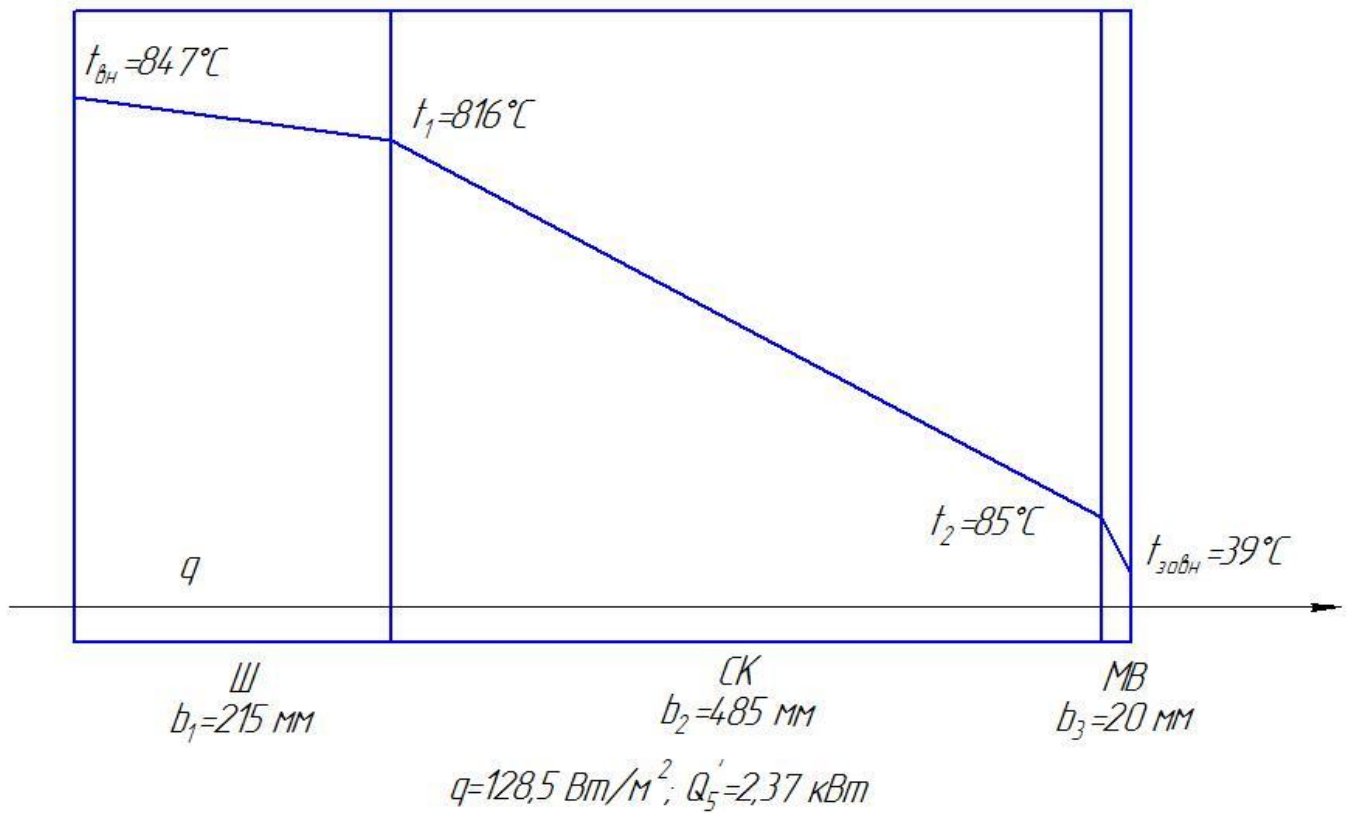
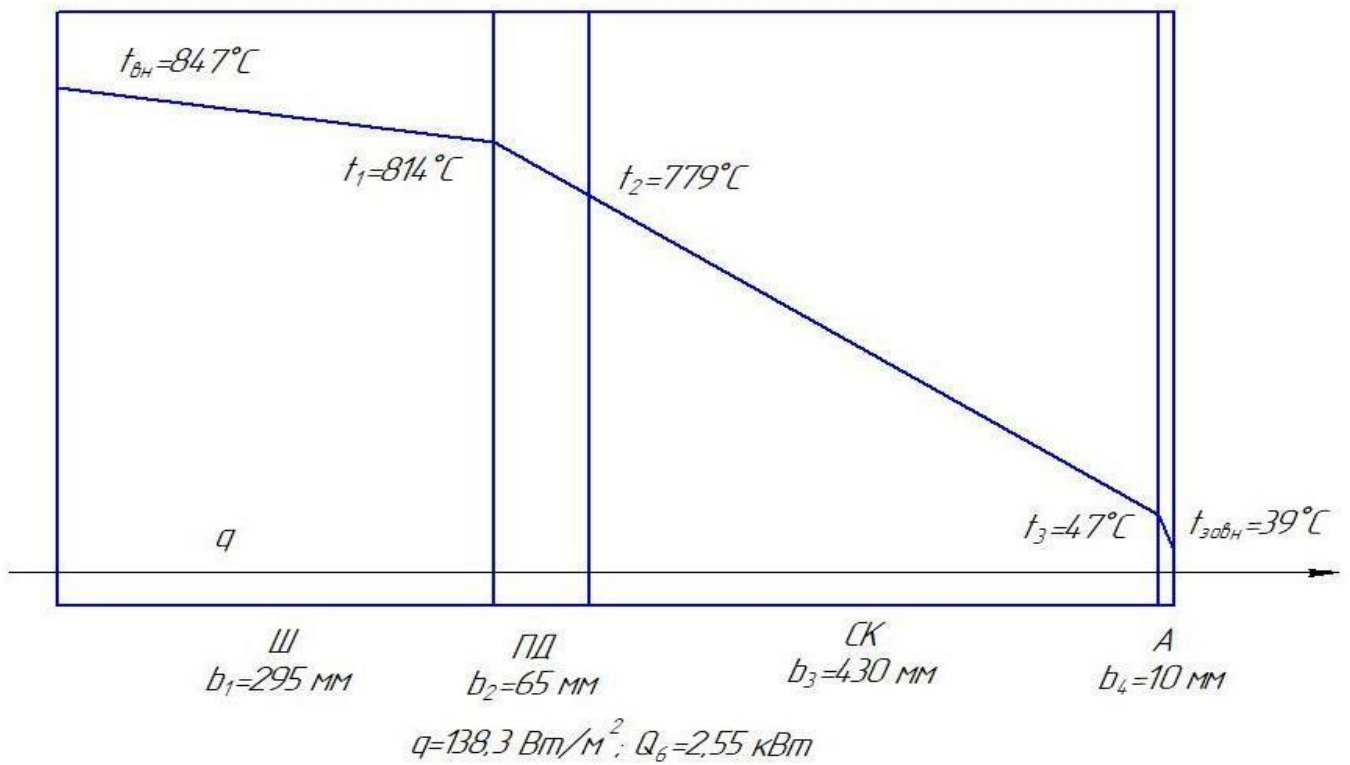


Рисунок 2.6 – Розподіл температур по товщині торцьової стінки, що знаходиться вище рівня розплаву

а) наявна конструкція



б) змінена конструкція

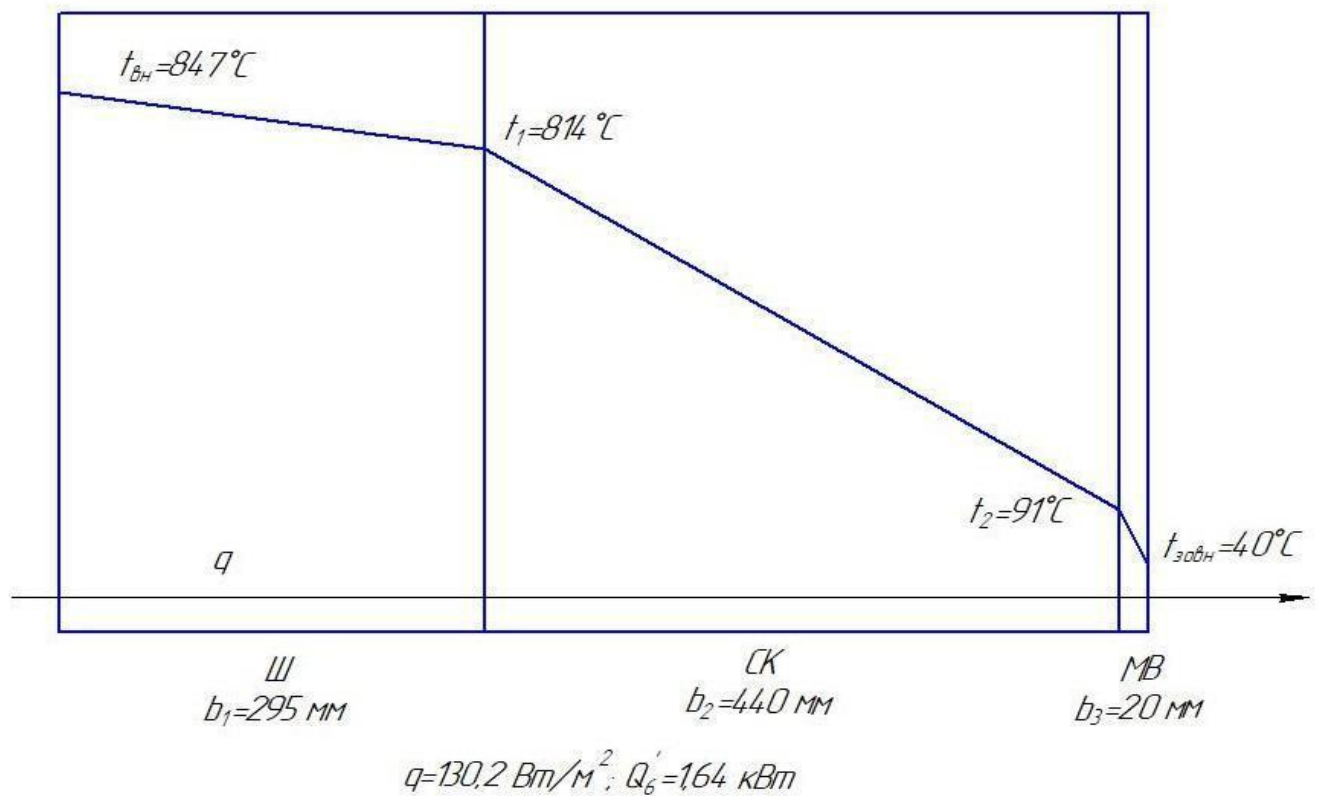


Рисунок 2.7 – Розподіл температур по товщині бокових стінок, що знаходяться вище рівня розплаву

Таблиця 2.1 – Вихідні дані і результати розрахунків теплових втрат огороженнями печі зміненої конструкції

Огородження	Поверхня F, м ²	Матеріали/товщини шарів (мм)						Теплові втрати Q, кВт
		1	2	3	4	5	6	
Подина	70,3	$\frac{K}{250}$	$\frac{ПШ}{70}$	$\frac{Ш}{230}$	$\frac{ПД}{180}$	$\frac{СК}{300}$	$\frac{МВ}{20}$	9,63
Склепіння	72,7	$\frac{Ш}{65}$	$\frac{ПД}{65}$	$\frac{СК}{600}$	$\frac{В}{228}$	$\frac{МВ}{20}$	-	7,78
Бокова задня стінка в розплаві	3,6	$\frac{K}{250}$	$\frac{ПШ}{50}$	$\frac{Ш}{230}$	$\frac{ПД}{180}$	$\frac{СК}{270}$	$\frac{МВ}{20}$	0,53
Торцюва стінка в розплаві	1,4	$\frac{K}{250}$	$\frac{ПШ}{70}$	$\frac{Ш}{115}$	$\frac{ПД}{115}$	$\frac{СК}{230}$	$\frac{МВ}{20}$	0,26
Торцюва стінка вище розплаву	18,4	$\frac{Ш}{295}$	$\frac{СК}{485}$	$\frac{МВ}{20}$	-	-	-	2,37
Бокові стінки вище розплаву	$\frac{21,9(e)}{27,8(г)}$	$\frac{Ш}{295}$	$\frac{СК}{440}$	$\frac{МВ}{20}$	-	-		$\frac{3,07(e)}{3,91(г)}$
Теоретичні теплові <small>критеріальні зовні</small>	$\frac{188,3(e)}{194,2(г)}$	-						$\frac{23,64(e)}{24,48(г)}$
Закриті форкамери, Q _{ф.з}	4,0	-						4,3
Сталеві листи, що закривають струмовідводи, Q _{ст}	$\frac{5,9(e)}{0(г)}$	-						$\frac{21,8(e)}{0(г)}$
Дійсні сумарні теплові втрати огороженнями, Q _{зовні втр}	198,2	-						$\frac{61,56(e)}{41,02(г)}$
Умовні позначення: К – корундова вогнетривка цегла; ПШ – порошок шамотний; Ш – шамот; ПД – пінодіатоміт; СК – силікат кальцію; МВ – мінеральна вата; В – вермикуліт. е – електричний нагрів; г – газовий нагрів.								

модернізованої конструкції витрати теплоти зменшилися приблизно на 66 %. При цьому зменшення витрат теплоти відбулося на 45 % за рахунок зменшення терміну відкриття форкамер і на 21 % - за рахунок зміни теплоізоляційних шарів.

Для зміненої конструкції печі при газовому нагріві порівняно з електричним витрати теплоти на компенсацію втрат огороженнями зменшилися на 9 %. Таким чином, газовий нагрів печі з енергетичної точки зору є більш ефективним ніж електричний.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані і результати розрахунку енергобалансу печі

Найменування величини	Позначення	Одиниця	Значення величини
1 Маса алюмінієвого брухту, що завантажується	m	кг	6000
2 Маса алюмінію, що виливається	m_1	кг	4980
3 Температура розплаву	t_p	С	750
4 Початкова температура брухту	$t_{п}^{бр}$	С	25
5 Температура нагрівача	t_n	С	1000
6 Площа форкамер	F_{ϕ}	m^2	4
7 Ефективна товщина шару, що випромінює	L	м	0,972
8 Кутовий коефіцієнт випромінювання	ϕ_{1-2}	-	0,439
9 Коефіцієнт діафрагмування	Φ	-	0,72
10 Температура робочого простору в районі форкамер	t_{ϕ}^{III}	К	1123
11 Кількість теплоти, що витрачається на нагрів алюмінієвого брухту до температури розплавлення	$Q_{нагр}$	кДж	$3.26 \cdot 10^6$
12 Кількість теплоти, що витрачається на розплавлення алюмінію	$Q_{пл}$	кДж	$1.94 \cdot 10^6$
13 Кількість теплоти, що витрачається на перегрів алюмінію до робочої температури, а також твердих домішок до цієї ж температури	$Q_{перегр}$	кДж	$0.574 \cdot 10^6$
14 Густина теплового потоку закритої форкамери	$q_{ф.з.}$	$Вт/м^2$	1065
15 Втрати теплоти через зовнішню поверхню закритої форкамери	$Q_{ф.з.}$	кВт	4,3
16 Втрати теплоти через відкриті форкамери	$Q_{ф.в.}$	кВт	258
17 Розмір отворів	$a \times b$	м х м	0,13 х 0,13
18 Втрати теплоти через відкриті отвори	$Q_o.$	кВт	1,2
19 Витрати теплоти на нагрів повітря, що всмоктується в робочий простір міксера при відкритті форкамер	$Q_{ф.п.}$	кВт	754
20 Термін відкриття форкамер в періоді плавки для зняття шлаку	t_v^{III}	с	3600

Таблиця 2.3 – Розподіл витрат теплоти для компенсації втрат через огороження для печі місткістю 6 т в циклі плавки алюмінієвого брухту при встановленій потужності 600 кВт

Поверхня печі	Значення витрат теплоти для варіантів					
	Базова конструкція (е)		Змінена конструкція (е)		Змінена конструкція (г)	
	кВт год	%	кВт год	%	кВт год	%
1	2	3	4	5	6	7

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6	7
Подина	139,8	9,4	56,6	7,5	54,6	8,0
Бокові і торцеві стінки	224,9	15,1	138,0	18,4	76,9	11,2
Склепіння	106,6	7,2	45,8	6,1	44,1	6,4
Відкриті форкамери	1012	67,9	506	67,4	506	73,7
Отвори	6,2	0,4	4,7	0,6	4,5	0,7
Всього	1489,5	100	751,1	100	686,1	100

2.2 Удосконалена конструкція печі

Вивчення теплових умов роботи печей для переплавки алюмінієвого брухту, а також практичні розрахунки їх енергобалансів вказують на доволі суттєві втрати теплоти, що призводить до зниження ККД ().

$$\eta_{\text{кор}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{P_{\text{вст}}}, \quad (2.20)$$

де $Q_{\text{кор}}$ – електрична потужність, що використовується корисно, кВт; $P_{\text{вст}}$ – встановлена потужність печі, кВт.

$$Q_{\text{кор}} = P_{\text{вст}} - Q_{\text{втр}}, \quad (2.21)$$

де $Q_{\text{втр}}$ – сумарні втрати теплоти в печі, кВт

$$Q_{\text{втр}} = (Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}} + Q_{\text{ф.з}} + Q_0 + Q_{\text{ф.з}} \cdot \frac{t_{\text{ф.в}}}{t_{\text{в}}}), \quad (2.22)$$

де $Q_{\text{зовн}}$, Q_0 , $Q_{\text{ф.з}}$, $Q_{\text{ф.в}}$ – теплові втрати через зовнішні обгородження; отвори; закриті та відкриті форкамери відповідно, кВт;

$t_{\text{в}}$ – термін плавки та відкриття форкамер відповідно, год.

Поряд з такими факторами, як втрати теплоти, на термін плавки також, очевидно, буде впливати і об'єм печі (внутрішній і зовнішній) при заданій місткості по алюмінію, а також відстань від електричних нагрівачів до металу.

Введемо поняття так званої корисної теплової напруги робочого простору печі (q_v , кВт/м³) – ця величина використовується при аналізі роботи топочних камер котлів.

$$q_v = \frac{Q_{\text{кор}}}{V_{\text{вн}}}, \quad (2.23)$$

де $V_{\text{вн}}$ – внутрішній об'єм робочого простору печі, м³.

Кількість теплоти, яка використовується в печі корисно, визначається за формулою

$$Q_{\text{кор}} = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{перегр}} \quad (2.24)$$

З іншого боку, ця ж кількість теплоти може бути визначена із співвідношення

$$Q_{\text{кор}} = A q_v V_{\text{ал}} 3600, \quad (2.25)$$

де A – коефіцієнт, який залежить від конструктивних і теплофізичних властивостей

футеровочно-теплоізоляційних матеріалів та температурно-теплових умов проведення плавки; $V_{\text{ал}}$ – об'єм алюмінієвого брухту, що завантажується в піч, м^3 .

$$V_{\text{ал}} = m_{\text{ал}} / \rho_{\text{ал}},$$

де $m_{\text{ал}}$ – маса алюмінієвого брухту, кг;

$\rho_{\text{ал}}$ – густина алюмінію, $\text{кг} / \text{м}^3$.

Для $m_{\text{ал}} = 6000$ кг та $\rho_{\text{ал}} = 2650$ $\text{кг} / \text{м}^3$ величина $V_{\text{ал}} = 2,264$ м^3 .

Співвідношення (2.25) в кінцевому підсумку використовується для визначення терміну плавки, зменшення якого може бути досягнуто при збільшенні корисної теплової напруги робочого простору печі q_v за рахунок зменшення внутрішнього об'єму $V_{\text{вн}}$ (див. рис. 2.8).

Для перевірки вірності визначення терміну плавки алюмінію скористаємося іншою методикою, використовуючи рівняння енергобалансу відносно корисної витрати кількості теплоти в печі, тобто

$$Q_{\text{кор}} = (P_{\text{вст}} - Q_{\text{втр}})3600 \quad (2.26)$$

Втрати теплоти визначимо з наступного рівняння

$$Q_{\text{втр}} = q_o V_{\text{зн}} (t_p - t_{\text{зовн}}), \quad (2.27)$$

де q_o – питома тепла характеристика печі, $\text{кВт} / (\text{м}^3$

$\text{К})$; $V_{\text{зн}}$ – зовнішній об'єм печі, м^3 ;

t_p і $t_{\text{зовн}}$ – відповідно температура в робочому просторі печі і навколишнього повітря, $^{\circ}\text{C}$. В подальших розрахунках прийматимемо $t_p = 850$ $^{\circ}\text{C}$, а $t_{\text{зовн}} = 20$ $^{\circ}\text{C}$.

Питома тепла характеристика печі розраховується зі співвідношення, яке рекомендується в опалювальній техніці для визначення питомої теплової характеристики будівель

$$q_o = \frac{P}{S} \kappa_{\text{ст}} + \alpha_o k_{\text{ф.в}} + k_{\text{ст}} + \frac{1}{H} n_1 k_{\text{скл}} + n_2 k_{\text{под}}, \quad (2.28)$$

де P – периметр печі, м;

S – площа поверхні, м^2 ;

H – висота, м;

α_o – коефіцієнт, що характеризує відношення площі форкамер до площі вертикальних зовнішніх стін;

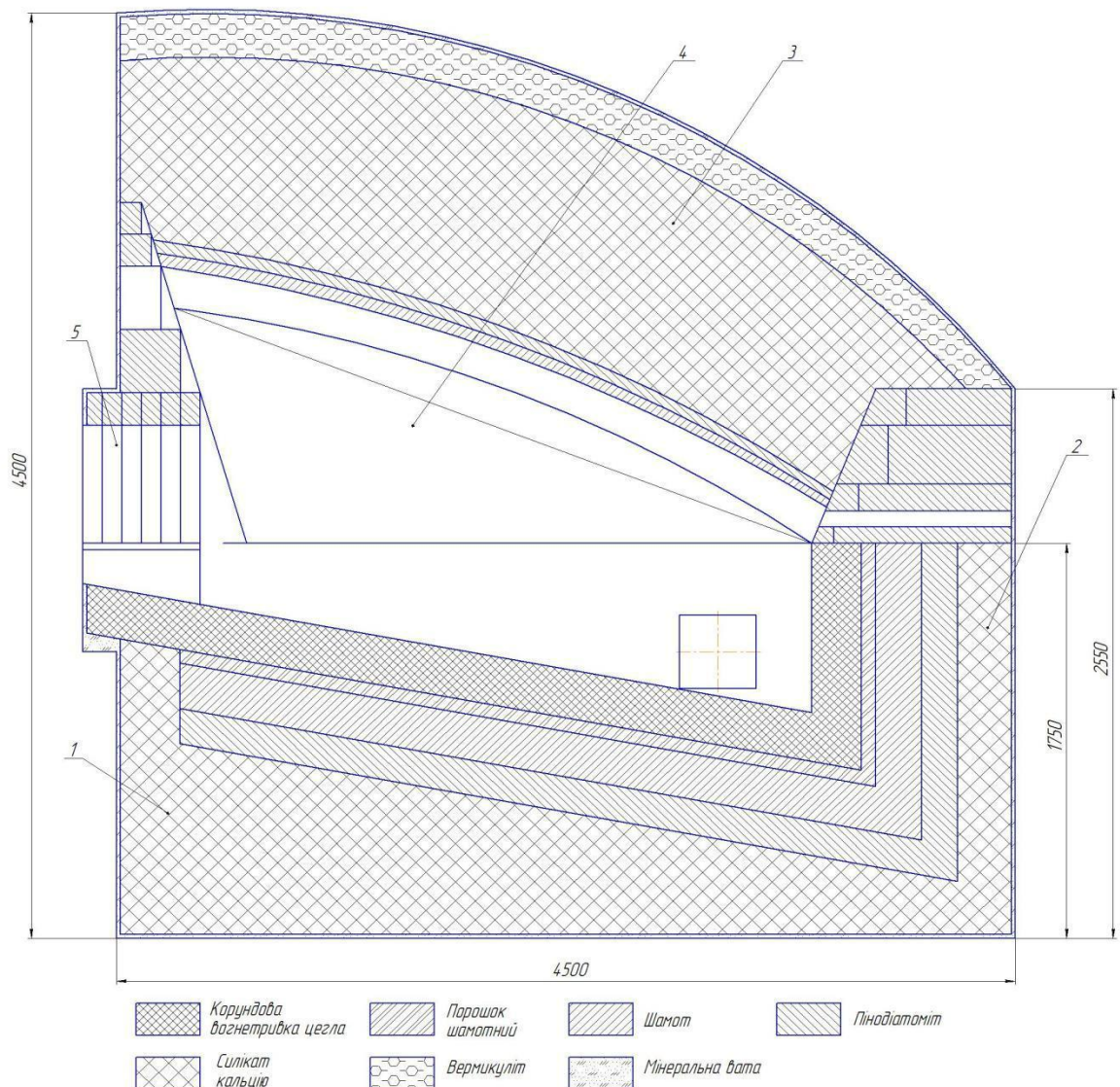
$k_{\text{ст}}$, $k_{\text{ф.в}}$, $k_{\text{скл}}$, $k_{\text{под}}$ – коефіцієнти теплопередачі для вертикальних стін, відкритих форкамер, склепіння і подини відповідно;

n_1 і n_2 – поправкові коефіцієнти на розрахункову різницю температур для склепіння і подини.

Для отримання величини q_o необхідно проведення детальних експериментів на печах різної місткості, конструкції футеровки, а також їх внутрішніх і зовнішніх об'ємів. Тому для оцінкових розрахунків величину q_o для наявної печі визначаємо з рівняння (2.28), а для печі з нахиленим склепінням – за виразом

$$q_{o.н.} = q_o \frac{V^{0.5}}{V}, \quad (2.29)$$

де $V_{зн.н.}$ і $V_{зн.}$ – зовнішні об'єми печі з нахиленим склепінням та наявної конструкції відповідно, m^3 .



1 – подина; 2 – бокова задня стінка; 3 – склепіння; 4 – робочий простір; 5 – форкамера

Рисунок 2.8 – Міксер з нахиленим склепінням (поперечний переріз):

Розрахунки для печі наявної конструкції та зі зміненою теплоізоляцією з типовим та нахиленим склепінням при газовому нагріву наведені в табл. 2.4.

При цьому за кресленнями визначали внутрішній та зовнішній об'єми печі: при типовому склепінні - $V_{\text{вн}} = 71 \text{ м}^3$, $V_{\text{зн}} = 265 \text{ м}^3$ (однакові для наявної конструкції та зі зміненою теплоізоляцією); при нахиленому склепінні - $V_{\text{вн,н}} = 55,8 \text{ м}^3$, $V_{\text{зн,н}} = 232 \text{ м}^3$ (однакові для наявної конструкції та зі зміненою теплоізоляцією). Параметр А для печі наявної конструкції і зі зміненою теплоізоляцією визначали при типовому склепінні за формулою (2.25), в якій термін плавки брали 4,96 год для печі наявної конструкції і 3,78 год – зі зміненою теплоізоляцією; для печі з нахиленим склепінням цей параметр брали аналогічним для кожного з варіантів відповідно. Величина $t_p = 850 \text{ }^\circ\text{C}$, а $t_{\text{зовн}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблиця 2.4 – Порівняльні характеристики енергетичної ефективності печей потужністю 600 кВт

Найменування величини	Базова конструкція		Зі зміненою теплоізоляцією	
	Типове склепіння	Нахилене склепіння	Типове склепіння	Нахилене склепіння
Корисно використана теплота $Q_{\text{кор}}$, кДж	$5,774 \cdot 10^6$			
Сумарні втрати теплоти $Q_{\text{втр}}$, кВт	276,5	227	175,7	144,4
Корисна потужність печі $Q_{\text{кор}}$, кВт	323,5	373	424,3	455,6
Корисна теплова напруга робочого простору q_v , кВт/м ³	4,56	6,68	5,98	8,16
Параметр А	31,3		31,3	
Питома теплова характеристика q_o , кВт/(м ³ К)	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Термін плавки, год	4,96	-	3,78	
- формула (2.25)	-	3,40	-	2,80
- формула (2.26)	-	4,30	-	3,50
ККД печі, %	53,9	62,1	69,7	75,9

2.3 Висновки до розділу 2

Аналіз розрахунків втрат теплоти зовнішніми огороженнями електричної печі наявної конструкції місткістю 6 т показав, що найбільше їх питоме значення характерно для сталевих листів,

які закривають струмопідводи, і поверхонь закритих форкамер; далі за цим показником розташовуються торцеві і бокові стінки в розплаві, ці ж стінки вище рівня розплаву, подина та склепіння.

Для оцінки енергетичної ефективності печі були виконані наступні варіантні розрахунки:

- варіант 1 – базовий – піч наявної конструкції з однією форкамерою розмірами $4 \times 1 \text{ м}^2$ і терміном її відкриття $\frac{\text{ш}}{\text{о}} = 60 \text{ хв}$;
- варіант 2 – піч зміненої конструкції (порівняно з варіантом 1 застосована теплоізоляція із силікату кальція замість пінодіатоміту);
- варіант 3 – піч зміненої конструкції (на відміну від варіанту 2 зменшений термін відкриття форкамер для зняття шлаку до 45 хв);
- варіант 4 – піч зміненої конструкції (на відміну від варіанту 2 в боковій стінці розміщені 2 форкамери розмірами $2 \times 1 \text{ м}^2$, термін відкриття форкамер – 30 хв кожна).

Аналіз отриманих результатів з теплового стану поверхонь огорожень показує, що, наприклад, при застосуванні силікату кальцію для теплоізоляції замість пінодіатоміту (варіант 2) температури зовнішніх поверхонь на 16 – 26 % нижче, ніж у печі наявної конструкції (варіант 1), а теплові втрати – на 28 – 45 % (середня величина біля 37 %).

З урахуванням інших елементів печі (закриті форкамери, сталеві листи в районі розміщення нагрівачів), де діатоміт в наявних конструкціях не використовувався, тобто і не відбувалась його заміна, теплові втрати через зовнішні поверхні міксера місткістю 6 т в цілому зменшуються на 26 %.

Для варіанту 2 при застосуванні теплоізоляції із силікату кальцію замість пінодіатоміту порівняно з варіантом 1 сумарні теплові втрати зменшені на 112,8 кВт год (або на 7,5 %) за рахунок їх зменшення через подину, бокові і торцеві стінки. Теплові втрати через відкриті форкамери та отвори практично не змінились. Термін плавки алюмінію зменшився на 12 хв.

Таким чином, найбільший внесок в загальні теплові втрати поверхнями печі для варіантів 2 і 1 складають втрати теплоти через відкриті форкамери при знятті шлаку, що дорівнюють більше як 1000 кВт.

Для варіанту 3 (заміна теплоізоляції і зменшенні терміну відкриття форкамери площею $F = 4 \text{ м}^2$ з 60 до 45 хв.) термін плавки порівняно з варіантом 1 зменшується на 42 хв. або на 13 %. Сумарні теплові втрати зменшились на 406 кВт або на 27 % в порівнянні з варіантом 1.

Для варіанту 4 (заміна теплоізоляції, застосування двох форкамер площею по 2 м^2 та терміном їх відкриття по 30 хв. кожна) термін плавки зменшився на 1 год 12 хв. або на 24 %. Сумарні теплові втрати поверхнями печі зменшились на 713 кВт або на 48 % в порівнянні з варіантом 1.

Результати наведених варіантних розрахунків свідчать про те, що найбільш суттєвий ефект,

пов'язаний з економією витрат електроенергії для плавки алюмінію, може бути досягнутий зі зменшенням теплових втрат через відкриті форкамери (зменшенні їх площі та терміну відкриття при знятті шлаку).

На термін плавки і ККД печі впливають втрати теплоти та об'єм (внутрішній та зовнішній) при заданій місткості по алюмінію.

Враховуючи вище перераховані фактори розроблена нова конструкція печі з нахиленим склепінням. За рахунок зменшення внутрішнього об'єму печі термін плавки мінімально зменшується на 14 % у порівнянні з типовим (арковим) склепінням, а ККД збільшується на 8,2 % для базової конструкції. При цьому термін плавки і ККД для печі зі зміненою теплоізоляцією склали 8 та 6,2 % відповідно.

3 ГАЗОВИЙ НАГРІВ ПЕЧІ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВКИ АЛЮМІНІЄВОГО БРУХТУ

За допомогою зовнішніх нагрівальних пристроїв здійснюється нагрівання алюмінієвого брухту до температури плавлення, нагрів до необхідної температури та підтримання цієї температури в період лиття виробів з алюмінію.

Зовнішні нагрівальні пристрої в міксерах і печах для переплавки алюмінієвого брухту на алюмінієвих заводах зазвичай є електричними, які виконуються дрововими або стрічковими з ніхрому чи сталі ЕІ – 626. Частий вихід цих нагрівачів з ладу потребує значних капітальних витрат на їх ремонт або повну заміну.

На газифікованих алюмінієвих заводах вельми перспективним є використання газового нагріву в міксерах для лиття алюмінію і печах для переплавки алюмінієвого брухту.

Нижче виконані розрахунки з вибору газових пальників для печі місткістю 6 т, проведена оцінка економічної ефективності переведення печі з електричного на газовий нагрів, розглянуті питання утилізації теплоти відхідних димових газів з печі.

3.1 Розрахунки та вибір газових пальників

Вихідні дані:

- теплова потужність зовнішніх нагрівальних пристроїв $Q_{\text{зовн}}$, кВт;
- елементарний склад палива (в % по об'єму) на робочу масу: CH_4 ; C_2H_6 ; C_3H_8 ; C_4H_{10} ; C_5H_{12} ; N_2 ; H_2S ; CO ; CO_2 ; H_2O , а також Q_{H}^c , кДж/м³;
- коефіцієнт надлишку повітря γ (рекомендується $\gamma = 1,05$).

Розрахунки

1 Визначають теплоту згорання для газоподібного палива (якщо не задана у вихідних даних)

$$Q_{\text{H}}^c, \text{кДж/м}^3$$

$$Q_{\text{H}}^c = 358\text{CH}_4 + 640\text{C}_2\text{H}_6 + 915\text{C}_3\text{H}_8 + 1190\text{C}_4\text{H}_{10} + 1465\text{C}_5\text{H}_{12} + 126,5\text{CO} + 107,5\text{H}_2 + 234\text{H}_2\text{S} \quad (3.1)$$

2 Визначається теоретично необхідна кількість повітря для спалювання палива (якщо вона не задана), м³/м³

$$V_{\text{п(г)}}^0 = 0,0476[0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 1,5\text{H}_2\text{S} + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 8\text{C}_5\text{H}_{12} - \text{O}_2] \quad (3.2)$$

3 Визначається дійсна витрата повітря для спалювання газоподібного палива, м³/м³

$$V_{\text{д}} = V_{\text{п(г)}}^0 \gamma \quad (3.3)$$

4 З рівняння теплового балансу визначається витрата палива на горіння

$$B_{\text{рн}} = \frac{Q_{\text{H}}^c}{Q_{\text{звн}}}, \quad (3.4)$$

де B_{Γ} – витрата газоподібного палива, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\eta_{\text{п}}$ – коефіцієнт використання палива.

Коефіцієнт використання палива пов'язаний з втратами теплоти з димовими газами, що відходять, а також втратами теплоти від хімічного недопалу.

Приймаючи втрати теплоти від хімічного недопалу для рідкого та газоподібного палива такими, що дорівнюють нулю, визначається коефіцієнт використання палива [6]

$$\eta_{\text{п}} = (100 - q_2)/100, \quad (3.5)$$

де q_2 – втрати теплоти з димовими газами, що відходять, %.

Величина q_2 , %, визначається за наступною формулою [7]

$$q_2 = (m + n_{\text{ух}}) \frac{t_{\text{н}}}{100}, \quad (3.6)$$

де m і n – постійні коефіцієнти, які залежать від виду палива і наведені в [5];

$\alpha_{\text{ух}}$ – коефіцієнт надлишку повітря з урахуванням підсмоктування (для природного газу $\alpha_{\text{ух}} = 1,10$);

$t_{\text{вдх}}$ – температура димових газів, що відводяться, $^{\circ}\text{C}$ (наприклад, її можна прийняти $t_{\text{вдх}} = t_{\text{ал}}^{\text{в}} +$

100 , $^{\circ}\text{C}$, де $t_{\text{ал}}^{\text{в}}$ – робоча температура в печі, при якій здійснюється лиття алюмінію);

$t_{\text{н}}$ – температура навколишнього повітря, $^{\circ}\text{C}$.

Тоді секундна витрата природного газу, $\text{м}^3/\text{с}$

$$B_{\Gamma} = \frac{Q_{\text{зовн}}}{Q_{\text{н вп}}} \quad (3.7)$$

5 Максимальна годинна витрата палива, $\text{м}^3/\text{год}$

$$B_{\text{max}}^{\Gamma} K_3 B_{\Gamma} 3600, \quad (3.8)$$

де K_3 – коефіцієнт нерівномірності витрати палива: для печей періодичної дії дорівнює $1,2 - 2,0$; для печей безперервної дії – $1,1 - 1,2$ (для міксерів величину K_3 можна прийняти $1,5$).

6 Годинна витрата повітря для спалювання палива, $\text{м}^3/\text{год}$

$$V_{\Gamma} B_{\Gamma} V_{\text{о п}(\Gamma)} \quad (3.9)$$

8 Вибір пальника

Тип та кількість пальників вибирається в залежності від отриманої витрати газу (B_{Γ}^{max}) за відповідними каталогами.

Крім цього, для спалювання газоподібного палива можна використати інжекційні пальники конструкції Стальпроекту, пальники типу ГНП конструкції Теплопроекту, а також двухпроводні пальники конструкції Стальпроекту типів ДВМ, ДВС, ДВВ [двухпроводна – Д, з високою

теплотою згорання – В, малої – (М), середньої – (С) і великої (В) потужності]. Останні пальники вибираються згідно з витратою повітря (від 20 до 13500 м³/год); діаметр носика пальника коливається від 20 до 425 мм.

В пальниках для природного газу низького тиску типу ГНП, розроблених Теплопроектм покращення змішування досягається шляхом встановлення завихрювача на повітряній стороні. Крім звичайного однострумінного газового сопла типу Б, для подальшого скорочення факелу використовують багато струмінний наконечник типу А, в якому потік газу розбивається на маленькі струї і подається і під кутом до потоку повітря [8].

В подальших розрахунках пальників використовуватимуть саме пальники типу ГНП через можливість працювати при низькому тиску газу в газопроводі.

Кількість пальників визначається за формулою, шт.

$$N_{\text{п}} = \frac{B_{\text{г}}}{B_{\text{г табл}}^{\text{max}}} \quad (3.10)$$

(отриману величину $N_{\text{п}}$ необхідно заокруглити до найближчого більшого цілого числа), де $B_{\text{г табл}}^{\text{г}}$ - продуктивність одного пальника [5]).

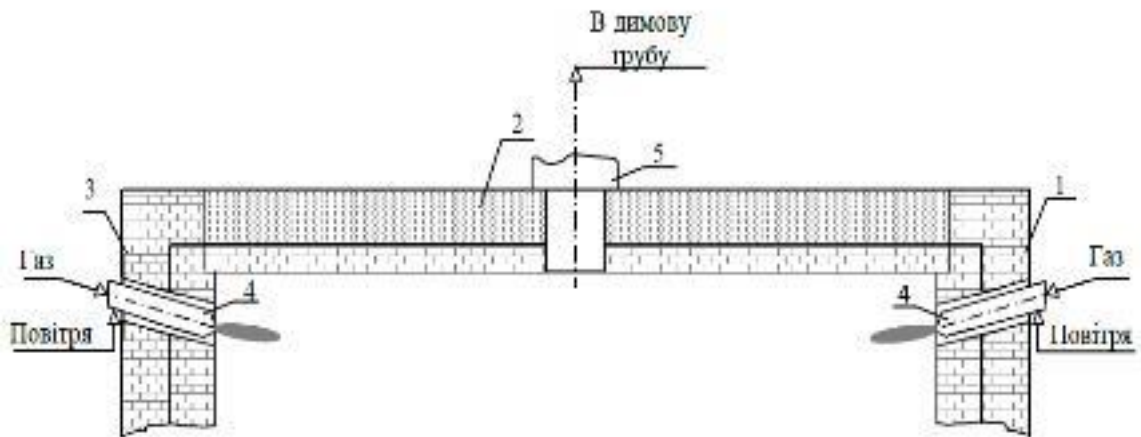
Для розрахунків природний газ брали з газопроводу Середня Азія – Центр за [5] з нижчою теплою згорання $Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 37560 \text{ кДж/м}^3$.

Задаємося робочою температурою в печі, при якій здійснюється процес лиття алюмінію $t_{\text{ал}}^{\text{в}} = 700^{\circ}\text{C}$ і температурою навколишнього повітря $t_{\text{н}} = 20^{\circ}\text{C}$. При цьому температуру димових газів, що відводяться беремо $t_{\text{відх}} = 800^{\circ}\text{C}$.

При заданих вихідних даних втрати теплоти з димовими газами склали 35 %, а коефіцієнт використання палива за формулою (3.5) складає 0,65.

Беремо $K_3 = 1,2$ – тоді максимальна годинна витрата палива складає $B_{\text{г max}} = 103,7 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$.

За [5] обрані 2 пальники типу ГПП-5 з продуктивністю 80 м³/год кожний. Пальники розміщуються в боковій передній стінці печі (див. рис. 3.1).



1 – торцьова стінка зі сторони заливного карману, 2 – скеління, 3 – торцьова стінка зі сторони переливної летки, 4 – пальники, 5 – патрубок для відведення димових газів.

Рисунок 3.1 – Схема розміщення пальників

3.2 Оцінка ефективності перевodu печі з електричного на газовий нагрів

При електричному нагріві печі витрата на електричну енергію в циклі плавки, грн/цикл, з урахуванням терміну витримки розплаву та лиття алюмінієвих виробів ($\tau_{\text{л}}$), визначається за формулою

$$B_e = P_{\text{вст.е}} Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}} Q_{\text{о.л}} C_e, \quad (3.11)$$

де C_e – вартість 1 кВт·год електроенергії, грн.

Беремо $\tau_{\text{л}} = 1$ год, $C_e = 1,29$ грн/кВт·год [9], тоді для печі зміненої конструкції потужністю 600 кВт з урахуванням визначених вище величин ϵ , $Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}}$, $Q_{\text{о.л}}$, згідно з формулою (3.11) витрата на електричну енергію складає

$$B_e = 600 \cdot 3,92 \cdot 61,56 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1,29 \cdot 3115 \frac{\text{грн}}{\text{цикл}}.$$

При газовому нагріві витрата на природний газ в циклі плавки, грн/цикл, також з урахуванням терміну витримки розплаву та лиття алюмінієвих виробів ($\tau_{\text{л}}$), визначається за формулою

$$B_{\text{г}} = \frac{K_3}{Q_{\text{с.н.в.п}}} P_{\text{вст.г}} Q_{\text{втр}}^{\text{зовн}} Q_{\text{о.л}} 3600 C_{\text{г}}, \quad (3.12)$$

$C_{\text{г}}$ – вартість 1 м³ природного газу, грн.

Згідно розрахунків, проведених вище при $t_{\text{р.в}} = 700$ °С і $t_{\text{н}} = 20$ °С, величина $q_2 = 35$ %, а коефіцієнт використання палива $\eta_{\text{в.п}} = 0,65$.

Беремо $K_3 = 1,2$; $Q_n^c = 37560 \text{ кДж/м}^3$ (для газопроводу Середня Азія – Центр); $Ц_f = 6,879 \text{ грн/м}^3$ [9] для печі потужністю 600 кВт, з урахуванням визначених вище величин, що входять в формулу (3.12), витрата на природний газ складає

$$B_{\text{г}} = \frac{1,2}{37560} \cdot 600 \cdot 3,78 \cdot 41,02 \cdot 1,2 \cdot 13600 \cdot 6,879 = 2800 \frac{\text{грн}}{\text{цикл}}.$$

Таким чином використання газового нагріву порівняно з електричним економічно більш ефективно, оскільки витрати на природний газ в циклі плавки для модернізованої печі потужністю 600 кВт зменшуються приблизно на 10 %.

Аналогічні розрахунки виконані і для печі наявної конструкції. при цьому витрата на електроенергію складе 4100 грн/цикл, а на природний газ – 3700 грн/цикл. Таким чином і для печі наявної конструкції при використанні газового нагріву економічні витрати зменшуються на 10 %.

3.3 Утилізація теплоти димових газів печі

При спалюванні природного газу характерними є великі втрати теплоти з димовими газами, які іноді досягають 50-65% від кількості теплоти, підведеної в піч. Кращим методом підвищення термічного ККД печей, а отже, і економії палива, є повернення в піч частини теплоти, що міститься в димових газах за рахунок підігріву в рекуператорах дуттьового повітря, що використовується для горіння палива.

Підігрів повітря не тільки забезпечує економію палива, але і підвищує температуру продуктів згоряння палива, що сприяє прискоренню процесів нагріву металу в печах і робить можливим застосування нових способів нагріву, зокрема безокисним, відкритим полум'ям і т. ін. Печі призначені для роботи при високій температурі робочого простору, тому вимагають застосування висококалорійного палива, але при установці рекуператорів можуть працювати на менш якісному (місцевому) паливі без зниження продуктивності і погіршення технологічних умов нагріву.

Для нагріву повітря застосовують керамічні та металеві рекуператори, причому останні мають ряд істотних переваг перед керамічними та їх впроваджують в промисловість все в більших масштабах. Якщо за останні 10-15 років майже нічого нового не зроблено для удосконалення керамічних рекуператорів, то за цей же період проведено великі роботи з конструювання і дослідження металевих рекуператорів нових типів і освоєння їх серійного виробництва на заводах. Зараз використовують багато різноманітних металевих рекуператорів на промислових печах: голчастих, термоблоків, трубчастих, радіаційних і ін.

3.3.1 Літературний огляд рекуператорів промислових печей

Залежно від матеріалу, з якого виготовлені елементи рекуператорів, останні поділяються

на металеві та керамічні [10].

Металеві рекуператори виготовляють з сірого чавуну, вуглецевої сталі, а також з жароміцних чавунів і сталей, які добре протистоять дії високих температур.

Переваги металевих рекуператорів полягають в наступному:

1 Металеві рекуператори значно компактніше керамічних.

3 Урахуванням великої товщини стінок елементів керамічного рекуператора практично отримують, що обсяг керамічного рекуператора при однаковій кількості переданого тепла приблизно в 10-12 разів більше металевого.

2 Відсутність необхідності обов'язкового пристрою боровів, так як металеві рекуператори розміщують на печах або близько печей над рівнем підлоги цеху, а іноді і в печах.

3 Велика герметичність, особливо рекуператорів, в яких окремі елементи з'єднані зварюванням. Це дає можливість застосовувати в металевих рекуператорах підігрів повітря (або газу) під великим тиском, а отже, подавати газоповітряну суміш в печі з більш високою швидкістю, що забезпечує можливість більшої кратності циркуляції продуктів згоряння в робочому просторі печей і, як наслідок, кращу рівномірність температур в ньому.

4 Можливість підігрівати (в сталевих рекуператорах) газ, що неможливо здійснити в керамічних рекуператорах.

5 Можливість використовувати теплоту відхідних з печей газів з порівняно низькою температурою (приблизно 500-600 °C), що значно розширює сферу їх застосування в порівнянні з керамічними рекуператорами і регенераторами.

До недоліків металевих рекуператорів відноситься невелика їх стійкість при високих температурах, що обумовлює значно менший термін служби металевих рекуператорів в порівнянні з керамічними і більш низький температурний рівень підігріву повітря.

У рекуператорах з нелегованого металу повітря і газ підігрівають до 300-350 °C, в рекуператорах з жароміцних сплавів - до 600-800 °C.

Цінною властивістю керамічних рекуператорів є можливість надійної їх роботи в виробничих умовах при підігріві повітря до температур понад 500-700 °C. Однак слід зазначити, що при температурі димових газів більше 1300 °C і підвищеної їх запиленості спостерігають зашлаковування керамічних елементів і різке погіршення роботи рекуператора.

Керамічні рекуператори застосовують в різному конструктивному оформленні, проте всі вони мають суттєві недоліки, до числа яких відносяться: дуже невелика газощільність, крихкість, відносно низький коефіцієнт теплопередачі, громіздкість, практична неможливість підігріву газоподібного палива і необхідність влаштування боровів. Зазначені недоліки значно звужують сферу застосування керамічних рекуператорів.

Хороша газощільність є необхідною умовою для нормальної роботи будь-якого рекуператора. Просочування повітря в димові канали рекуператора тягне за собою зниження температури димових газів, зменшення тяги димососа, зменшення температури підігріву повітря, зниження продуктивності печі.

Зіставляючи переваги і недоліки роботи металевих і керамічних рекуператорів, слід зазначити, що заміна зламаного металевого рекуператора вимагає декількох годин, а керамічного - кілька днів або тижнів.

Перераховане вище дозволяє зробити висновок, що керамічні рекуператори доцільно застосовувати тільки для підігріву повітря до температур вище 600-700 °С. При підігріві до менших температур найбільш раціонально підігрівати повітря - в металевих рекуператорах.

Однак при виборі конструкції рекуператора для того чи іншого випадку його установки, крім теплової ефективності поверхні нагрівання, потрібно обов'язково враховувати засмічування і теплостійкість елементів рекуператора, що іноді змушує застосовувати рекуператори з меншою тепловою ефективністю, але більш теплостійкі.

3.3.2 Конвективні рекуператори з чавунних труб. Опис конструкції

Гладкостінні чавунні труб мають низьку теплову ефективність, і в даний час застосовують в основному так звані «голчасті» чавунні труби [10]. Поверхню їх теплообміну відливають з ребрами у вигляді голок круглої або витягнутої - овальної в перетині форми. Таким чином, основним елементом голчастого рекуператора є чавунна голчаста труба овальної в перетині форми із зовнішніми і внутрішніми (або тільки внутрішніми) голками.

Зазвичай повітря проходить усередині труби, а димові гази омивають трубу ззовні. Труба з обох кінців забезпечена фланцями коробчастої форми, в яких виконані отвори для болтів та канавки (пази) для розміщення спеціальної ущільнювальної рекуператорної замазки при з'єднанні фланців одного з іншим і з кріпильними рейками. Бічні поверхні фланців механічно оброблені. Щоб можна було в широких межах змінювати теплову потужність, а отже, і розміри рекуператорів, голчасті труби випускають різної довжини, але одного поперечного перерізу. Серійно випускають труби довжиною 880, 1135 і 1640 мм. За конструкцією всі чавунні голчасті труби поділять на дві основні групи: односторонньо - голчасті і двосторонньо-голчасті. У односторонньо-голчастих труб голки знаходяться тільки на внутрішній (повітряної) стороні; зовнішня (димова) сторона їх гладка.

Зважаючи на відсутність голок з димової сторони теплостійкість односторонньо-голчастих труб вища, а забруднюваність менша, ніж у двосторонньо-голчастих. Теплова ефективність двосторонньо-голчастих труб значно вище, ніж односторонньо-голчастих, але вони менш

теплостійкі і легше піддаються засміченню. Ці труби можна застосовувати для рекуператорів, що встановлюються на печах, димові гази яких відносно чисті, тобто на печах, опалювальних чистим газом і не мають виносу з печі окалини, пилу і т.д. Температурна межа застосування двосторонньо-голчастих рекуператорів при однаковому складі металу труб нижче, ніж односторонньо-голчастих.

Зібрану секцію рекуператора, через яку повітря проходить один раз, не змінюючи напрямку, називають «ходом». Вибір числа «ходів» голчастого рекуператора залежить в основному від наявного тиску дуття і від кінцевої температури нагрівання повітря. Найбільш часто застосовують двоходову установку рекуператора (див. рисунок 3.2), що забезпечує підігрів повітря до 300-400 °С при температурі димових газів, що входять в рекуператор, приблизно 750-800 °С.

Рекуператор встановлюють у верхній частині печі на спеціальну горизонтальну плиту 1. Через повітряні коробки 2 повітря проходить спочатку через верхню частину рекуператора (1-й хід), а потім надходить у нижню частину (2-й хід) відбираючи теплоту від димових газів.

У кожній секції (ході) рекуператора 12 голчастих труб. Димові гази рухаються в вертикальному напрямку омиваючи оребрені труби 4. З'єднання двох секцій (ходів) в зображеному рекуператорі виконано за допомогою так званої «проміжної» рейки 3, розміщеної між кріпильними (обв'язувальними) рейками 5 сусідніх секцій рекуператора і прикріпленою до них болтами.

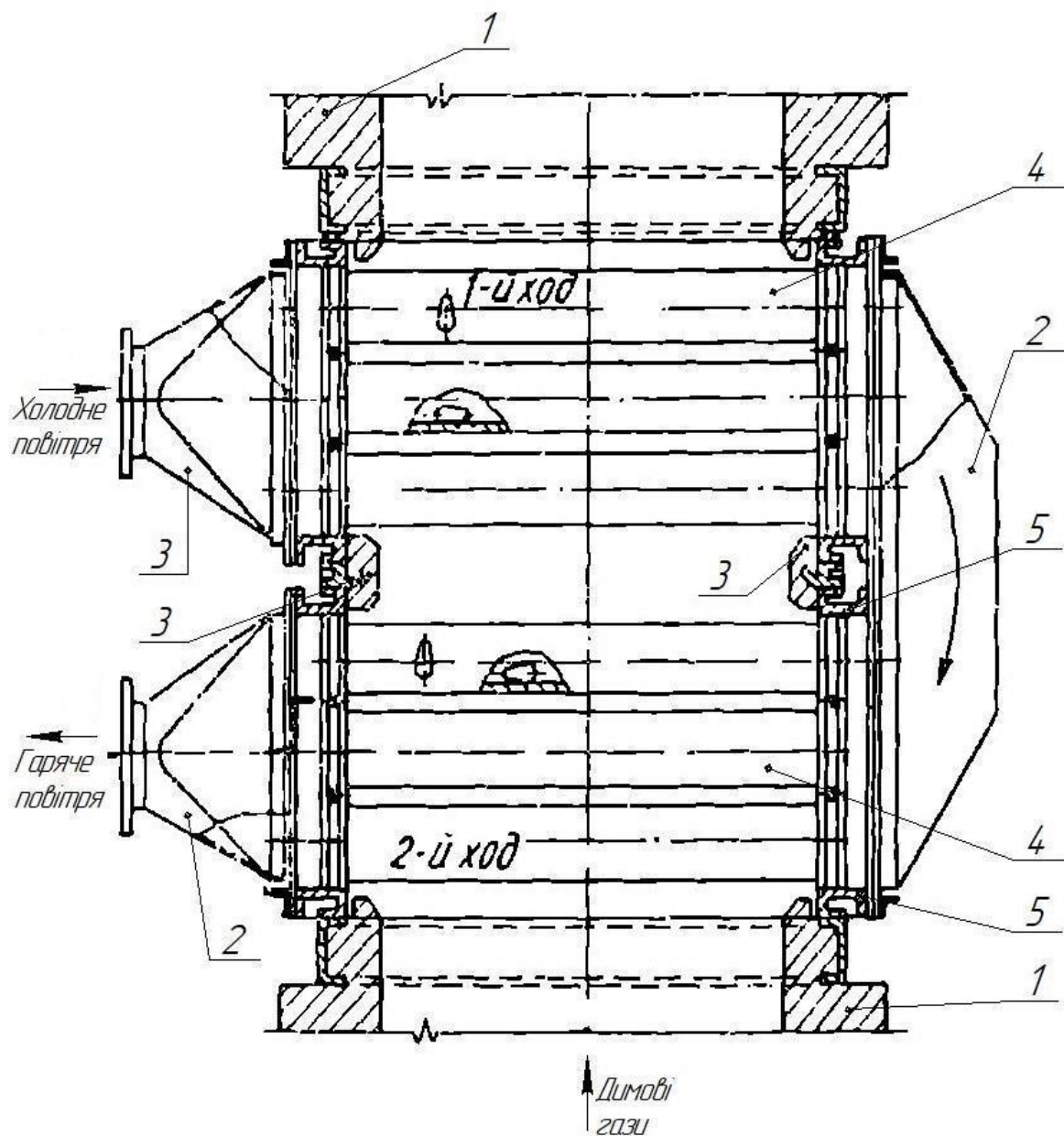
Двосторонньо-голчасті труби випускаються так званих типів 17,5 і 28 з голками на димовій стороні овального перетину висотою 40 мм і відстанню між осями голок відповідно 17,5 або 28 мм. У голчастих рекуператорних труб всіх типів абсолютно однакова конструкція внутрішньої (повітряної) голчастої поверхні, забезпеченою голками висотою 20 мм з відстанню між осями голок 14 мм.

Голчасті труби без зовнішніх голок з нормальними фланцями застосовують в тому випадку, коли в одній секції рекуператора одночасно встановлюють двосторонньо-голчасті і односторонньо - голчасті труби, причому з останніх роблять перші ряди труб з боку входу димових газів, що мають найбільш високу температуру. Якщо весь рекуператор виконують з односторонньо - голчастих труб, то застосовують труби тільки зі зменшеними фланцями, так як при однаковій поверхні нагрівання такі труби мають менші розміри. Основні характеристики голчастих рекуператорних труб наведені в [10].

3.3.3 Методика розрахунку голчастого рекуператора

Вихідними даними до розрахунку слугують наступні величини:

- витрата повітря, що нагрівається при вході в рекуператор $V_{\text{пов}}^*$, м³/год;
- температура, °С:



1 – горизонтальна плита; 2 – повітряні короби; 3 – проміжна рейка; 4 – оребрені труби; 5 – кріпильні рейки

Рисунок 3.2 – Двоходовий голчастий рекуператор

підігріву повітря у печі;

початкова повітря;

димових газів при вході в рекуператор.

Визначення параметрів димових газів на вході в рекуператор

1 Дійсний об'єм водяної пари в димових газах, м³/м³

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{д}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{о}} \cdot 1,6 \cdot \text{відх} \cdot (d_{\text{пов}} - 0,01) \cdot 0,0161 \cdot (\text{відх} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^{\text{о}}, \quad (3.13)$$

де $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{о}}$, $V_{\text{пов}}^{\text{о}}$ – теоретичні об'єми водяної пари та повітря, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

відх – коефіцієнт надлишку повітря;

d

пов – вологовміст повітря, $\text{кг}/\text{кг}$ с.п (беремо $0,01 \text{ кг}/\text{кг}$ с. п).

2 Дійсний об'єм димових газів, $\text{м}^3/\text{м}^3$

$$V_{\text{г}} = V_{\text{RO}_2}^{\text{о}} + V_{\text{N}_2}^{\text{о}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{д}} \cdot (\text{відх} - 1) \cdot V_{\text{пов}}^{\text{о}}, \quad (3.14)$$

де $V_{\text{RO}_2}^{\text{о}}$, $V_{\text{N}_2}^{\text{о}}$ – теоретичні об'єми повітря і димових газів, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

3 Витрата димових газів на вході в рекуператор, $\text{м}^3/\text{год}$

$$V_{\text{д}} = V_{\text{г}} \cdot B_{\text{г}}^{\text{max}}, \quad (3.15)$$

де $B_{\text{г}}^{\text{max}}$ – максимальна годинна витрата газоподібного палива, $\text{м}^3/\text{год}$.

З огляду на те, що голчасті труби виконані з сірого чавуну, приймаємо температуру димових газів, що входять в рекуператор, 750°C . Для початкової температури димових газів і температури розбавлюваного повітря визначаємо фактор розведення ϕ за формулою

$$\frac{h_{\text{д}} - h_{\text{пов}}}{h_{\text{г}} - h_{\text{пов}}}, \quad (3.16)$$

де $h_{\text{д}}$ і $h_{\text{г}}$ – ентальпії димових газів до і після розбавлення, $\text{кДж}/\text{м}^3$;

$h_{\text{пов}}$ – ентальпія повітря, яке надходить на розбавлення димових газів, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

Розрахункова витрата димових газів, $\text{м}^3/\text{год}$

$$V_{\text{д}} = V_{\text{г}} \cdot (1) \quad (3.17)$$

Об'ємна витрата розбавлюваного повітря, $\text{м}^3/\text{год}$

$$V_{\text{пов}}^{\text{розб}} = V_{\text{д}} \cdot \phi, \quad (3.18)$$

Ентальпія повітря, $\text{кДж}/\text{год}$

$$q_{\text{пов}} = V_{\text{пов}} \cdot c_{\text{пов}} \cdot (t_{\text{пов}} - t_{\text{ов}}) \quad (3.19)$$

Втрати теплоти рекуператором в оточуюче середовище приймаються рівними 10% . Тоді кількість теплоти, яку повинні віддати димові гази становить

$$q_{\text{г}} = \frac{q_{\text{пов}}}{0,9} \quad (3.20)$$

Годинна ентальпія димових газівна вході в рекуператор, $\text{кДж}/\text{год}$, при об'ємній теплоємності $c_{\text{д}}$ визначається наступним чином

$$q_{\text{д}} = V_{\text{д}} \cdot c_{\text{д}} \cdot t_{\text{д}} \quad (3.21)$$

Годинна ентальпія димових газів, $\text{кДж}/\text{год}$, на виході з рекуператора

$$q_{\text{д}} = q_{\text{д}} q_{\text{від}} \quad (3.22)$$

Вибираємо об'ємну теплоємність димових газів на виході з рекуператора попередньо задавшись їх температурою. За температурою визначається теплоємність з таблиць теплофізичних параметрів димових газів. Тоді визначається дійсна температура димових газів на виході з рекуператора, °С

$$t_{\text{д}} = \frac{q_{\text{д}}}{V_{\text{д}} c_{\text{д}}} \quad (3.23)$$

Наступним пунктом є визначення середньоарифмічного температурного напору, який визначають за формулою

$$t = \frac{t_{\text{б}} - t_{\text{м}}}{\ln \frac{t_{\text{б}}}{t_{\text{м}}}}, \quad (3.24)$$

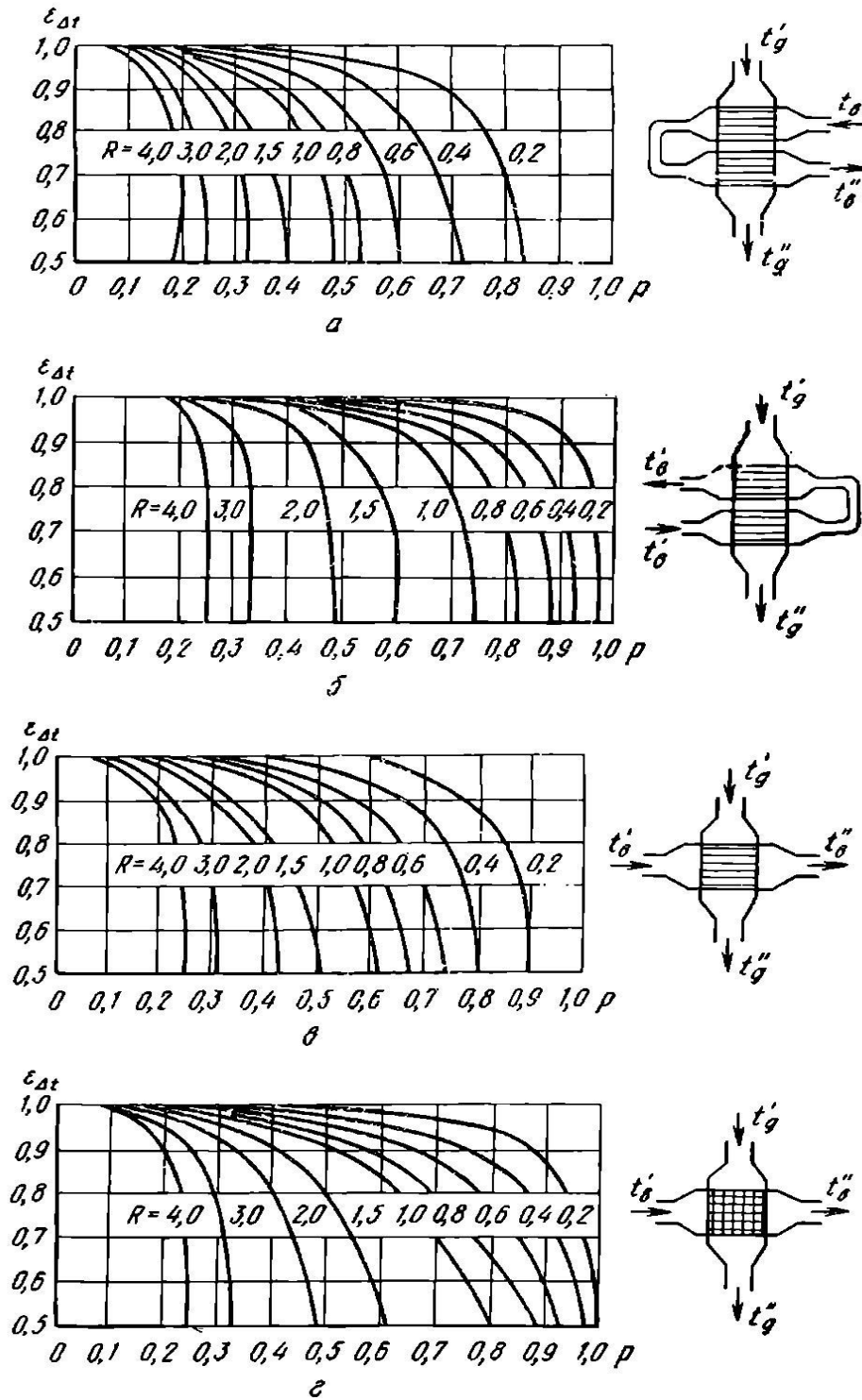
де $t_{\text{б}}$, $t_{\text{м}}$ – відповідно більша й менша різниця температур, °С.

Якщо позначити через $t_{\text{д}}$ – початкову температуру димових (при вході в рекуператор); $t_{\text{д}}$ – кінцеву температуру димових газів (при виході з рекуператора); $t_{\text{пов}}$ – початкову температуру повітря (при вході в рекуператор) і $t_{\text{пов}}$ – кінцеву температуру повітря (при виході з рекуператора), то в формулу при паралельній течії $t_{\text{б}} = t_{\text{д}} - t_{\text{пов}}$; $t_{\text{м}} = t_{\text{д}} - t_{\text{пов}}$, а при протитечії $t_{\text{б}} = t_{\text{д}} - t_{\text{пов}}$; $t_{\text{м}} = t_{\text{д}} - t_{\text{пов}}$. Формулу (3.24) справедлива для протитечії і паралельної. При іншому характері руху димових газів і повітря (газу) потрібно величину \bar{t} , отриману для протитечії за формулою (3.24), помножити на поправковий коефіцієнт ϵ , який визначається як функції параметрів P і R .

$$R = \frac{t_{\text{д}} - t_{\text{пов}}}{t_{\text{пов}} - t_{\text{д}}} \quad (3.25)$$

$$P = \frac{t_{\text{пов}} - t_{\text{д}}}{t_{\text{д}} - t_{\text{пов}}} \quad (3.26)$$

Залежність поправкового коефіцієнта ϵ від P і R для найбільш розповсюджених схем руху повітря і димових газів в рекуператорах показана на рисунку 3.3. При підігріві повітря до 300-400 °С величина поправкового коефіцієнта ϵ мала і нею можна знехтувати. Для більш високих температур підігріву коефіцієнт ϵ необхідно враховувати, оскільки похибка при визначенні t може бути відносно великою.



а – комбінований хрестоподібний паралельний тік;

б – комбінований хрестоподібний протитік;

в – одинокий хрестоподібний тік (один потік перемішується, потік в трубах не перемішується);

г – одинокий хрестоподібний тік (обидва потоки не перемішуються)

Рисунок 3.3 – Поправковий коефіцієнт ε_t для визначення t

Швидкість повітря в рекуператорних трубах усіх типів рекомендують приймати від 3,0 до 8,0 м/с.

Швидкість димових газів рекомендовано: для труб типу 17,5 і 28 – 0,5-2,0 м/с; для односторонньо-голчастих труб – 2,0-4,0 м/с.

Щоб краще зберігався матеріал труб рекуператора, рекомендують обирати швидкості повітря і димових газів так, щоб відношення швидкості повітря і димових газів було не менше 4,0 для двосторонніх-голчастих труб і не менше 1,5 – 2,0 для односторонньо-голчастих труб.

Загальний переріз каналів для проходження повітря

$$f_{\text{пов}} = \frac{V_{\text{пов}}}{w_{\text{пов}}} \quad (3.27)$$

Загальний переріз каналу для проходження димових газів

$$f_{\text{д.г.}} = \frac{V_{\text{д.г.}}}{w_{\text{д.г.}}} \quad (3.28)$$

Визначається кількість труб зі сторони повітря та димових газів. При цьому площу поперечного перерізу обирають з [10].

Відповідно до вибраних вище швидкостей газів та повітря в рекуператорі за графіком [9] визначають коефіцієнт теплопередачі.

Поверхня нагріву рекуператора

$$F = \frac{q_{\text{пов}}}{k \cdot t} \quad (3.29)$$

Для технічних розрахунків рекомендують наступну емпіричну формулу, за якою визначають аеродинамічний опір внутрішньої поверхні голчастих труб [11]

$$h_{\text{пов}} = \frac{A \cdot w_0^2}{273} \quad (3.30)$$

де $h_{\text{пов}}$ – аеродинамічний опір голчастої труби зі сторони повітря (всередині),

Pa ; w_0^2 – приведена швидкість повітря в трубі, м/с;

T – середня температура повітря в трубі, К;

A – коефіцієнт, що залежить від довжини труби [10].

При розрахунках рекуператорів величину аеродинамічного опору, отриману за формулою (3.30), слід збільшити на 25-30%, враховуючи неточність виливки і можливе відхилення розмірів голок від проектних, а також підвищення шорсткості голок від корозії при транспортуванні труб від заводу-виготовлювача до місця збірки.

Для визначення аеродинамічного опору зовнішньої (димової) поверхні голчастих труб всіх трьох типів рекомендують наступну емпіричну формулу [11]

$$h_d (n + m) T_{w20} 10^{-4}, \quad (3.31)$$

де h_d – аеродинамічний опір зовнішньої поверхні голчастих труб,

Па; n – число рядів труб в напрямку руху димових газів;

m – число секцій (ходів) рекуператора в напрямку руху димових газів;

α – коефіцієнт, що залежить від типу труб [10].

Відповідно до представленої вище методики та вихідних даних в результаті розрахунків обрано односторонньо-голчастий металевий рекуператор. Обрання виконано з внутрішньої сторони труби по ходу руху повітря. Результати розрахунків та технічні характеристики рекуператора представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків та технічні характеристики рекуператора

Найменування величини	Позначення	Одиниця	Значення величини
1 Температура підігріву повітря	$t_{\text{задан}}$	°C	350
2 Температура зовнішнього повітря	$t_{\text{пов}}$	°C	20
3 Температура димових газів при вході в рекуператор	$t_{\text{вдх}}$	°C	800
4 Об'ємна витрата повітря	$V_{\text{пов}}$	м ³ /с	0,285
5 Об'ємна витрата димових газів	$V_{\text{д.г.}}$	м ³ /с	0,392
6 Середньологарифмічний напір при перехресній течії	$\Delta t_{\text{ср}}$	°C	325,7
7 Довжина труби	$l_{\text{тр}}$	мм	1135
8 Площа перерізу для проходження димових газів	$f_{\text{д.г.}}$	м ²	0,055
9 Площа перерізу для проходження повітря	$f_{\text{пов.}}$	м ²	0,008
10 Кількість труб за рухом повітря	$n_{\text{пов.}}$	шт.	6
11 Кількість трубу за рухом димових газів	$n_{\text{д.г.}}$	шт.	3
12 Коефіцієнт теплопередачі	k	Вт/(м ² °C)	33,5
13 Площа поверхні нагріву	F	м ²	12,0
14 Аеродинамічний опір зі сторони повітря	$h_{\text{пов}}$	Па	242,5
15 Аеродинамічний опір зі сторони газів	$h_{\text{д.г.}}$	Па	6,5

3.3.4 Економія палива при утилізації теплоти димових газів

Величина економії палива в залежності від його теплоти згорання і різних температурних умов роботи печі і рекуператора визначається за формулою [10]

$$E = \frac{\frac{h''_{\text{д.г.}}}{h'_{\text{д.г.}}} 100}{1 - \frac{h''_{\text{д.г.}}}{h'_{\text{д.г.}}} (1 - \frac{h''_{\text{д.г.}}}{h'_{\text{д.г.}}})}, \quad (3.32)$$

де E – економія палива, % по відношенню до витрати палива при роботі печі без підігріву повітря;

$h'_{\text{д.г.}}$ – ентальпія 1 м^3 димових газів в топці, кДж/м^3 ;

$h''_{\text{д.г.}}$ – ентальпія 1 м^3 димових газів на виході з міксера, кДж/м^3 ;

– коефіцієнт рекуперації теплоти.

Формула (3.32) отримана на основі співставлення теплових балансів печей з рекуператором і без рекуператора.

Коефіцієнт рекуперації теплоти визначається за формулою

$$\frac{V_{\text{пов. д.г.}} h_{\text{пов. д.г.}}}{V_{\text{д.г.}} h_{\text{д.г.}}}, \quad (3.33)$$

де $V_{\text{пов. д.г.}}$ і $V_{\text{д.г.}}$ – відповідно об'єми повітря і димових газів;

$h_{\text{пов. д.г.}}$ і $h_{\text{д.г.}}$ – ентальпії 1 м^3 нагрітого повітря, який потрапляє в піч, і 1 м^3 димових газів, які покидають її.

Початкова ентальпія димових газів визначається наступним чином

$$h_{\text{д.г.}} = \frac{Q_{\text{п. д.г.}}}{V_{\text{д.г.}}}, \quad (3.34)$$

де $Q_{\text{п. д.г.}}$ – нижча теплота згоряння газоподібного палива, кДж/м^3 .

Ентальпія відхідних газів з печі

$$h_{\text{д.г.}} = t_{\text{д.г.}} \cdot c_{\text{д.г.}}, \quad (3.35)$$

Беремо $V_{\text{пов. д.г.}} = 10,4055 \text{ м}^3/\text{м}^3$ та $V_{\text{д.г.}} = 11,62 \text{ м}^3/\text{м}^3$. При цьому ентальпії димових газів на вході

та на виході з рекуператора дорівнюють $h_{\text{д.г.}} = 3232,3 \text{ кДж/м}^3$ і $h_{\text{д.г.}} = 1216 \text{ кДж/м}^3$.

Тоді коефіцієнт рекуперації теплоти 0,337.

За формулою (3.32) визначаємо економію палива

$$E = 0,337 \frac{\frac{1216}{3232,3} 100}{1 - \frac{1216}{3232,3} (1 - 0,337)} = 16,9 \text{ \%}.$$

Варто відмітити, що на практиці економія палива, що отримана при підігріві повітря, дещо вища, ніж теоретичне значення, визначене за формулою (3.32), оскільки в формулі не враховується

ряд позитивних явищ, наприклад, покращення якості горіння палива, зниження вмісту окису вуглецю у відхідних газів, а також підвищення продуктивності печі.

3.4 Висновки до розділу 3

Для модернізованої печі потужністю 600 кВт використання газового нагріву порівняно з електричним з економічної точки зору є більш ефективно, оскільки витрати на природний газ в циклі плавки зменшуються приблизно на 10 %. Варто відмітити, що на вартість 1 циклу плавки з використанням газового нагріву у порівнянні з електричним, окрім втрат теплоти через зовнішні огорожуючі конструкції та отвори суттєво впливають величини коефіцієнта нерівномірності витрати палива, коефіцієнта використання палива, нижчої теплоти згорання палива.

Для отримання більш детальних рекомендацій, коли краще використовувати газовий нагрів на заміну електричному, потрібно проводити техніко-економічні розрахунки.

В результаті розрахунку пристроїв для спалювання газоподібного палива обрано 2 пальники конструкції інституту «Теплопроект» типу ГПП-5 з продуктивністю по $80 \text{ м}^3/\text{год}$ кожний. Пальники розміщуються в боковій передній стінці печі.

З метою економії природного газу на плавку алюмінієвого брухту розглянутий варіант встановлення рекуператора для підігріву дуттьового повітря. В результаті розрахунків обрано односторонньо-голчастий металевий рекуператор. В разі встановлення даного технологічного агрегату температура димових газів знижується від 800°C до 390°C , при цьому температура дуттьового повітря підвищується від 20°C до 350°C . Рекуператор має площу поверхні теплообміну 12 м^2 і є не громіздким, що значно полегшує процес встановлення і монтаж на піч для переплавки алюмінієвого брухту.

Величина економії палива, яка може бути досягнута при заданих вихідних даних з використанням двоходового голчастого металевого рекуператора складає 16,9 %. Однак варто відмітити, що при визначенні економії палива за наведеними вище формулами не враховується ряд позитивних явищ, зокрема, покращення якості горіння палива, зниження вмісту окису вуглецю у відхідних газів, а також підвищення продуктивності печі.

4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В СТІНКАХ ПЕЧІ

Науково-технічний прогрес проходить при все більш широкому використанні програм ЕОМ, які дозволяють провести моделювання низки різноманітних процесів і отримати необхідну базу невідомих величин та залежностей, здійснити перевірку гіпотез, знайти оптимальні параметри досліджуваної системи, виявляти зв'язки та одержувати необхідну інформацію в разі зміни параметрів або режимів роботи. Моделювання займає проміжне місце між аналітичними дослідженнями та натурними експериментами.

Моделювання температурних полів на окремих дослідних ділянках дозволяє отримувати результати, які можуть значно відрізнятись від результатів отриманих на реальних печах. Головною причиною цього є перш за все розміри реальних промислових печей для переплавки алюмінієвого брухту, які можуть перевищувати розміри моделі в декілька десятків разів. Використання при дослідженні реальних печей дозволяє отримати результати, які більш точно відображають процес теплообміну в реальних умовах. Експериментальні дослідження проводяться з метою вивчення особливостей фізики процесу, механізму теплопровідності, факторів, що впливають на процес.

З метою проведення дослідів застосовується математичне моделювання в програмі SolidWorks. Отримані результати можна порівнювати та переносити на реальні установки.

4.1 Постановка задачі

Мета роботи: отримати розподіл температур по товщині багат шарових стінок печі для переплавки алюмінієвого брухту.

Задачі, які необхідно вирішити:

- 1) Розробити декілька моделей багат шарових стінок, які відрізняються між собою товщинами і послідовністю влаштування футеровочних та теплоізоляційних матеріалів печі.
- 2) Перевірити, що температура зовнішньої стінки відповідає санітарним нормам і не перевищує 60°C .
- 3) Проаналізувати адекватність побудованих моделей, порівнявши отримані результати з результатами, що отримані за допомогою програмних розробок науково-дослідного центру «Ресурсозберігаючі технології» НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Для вирішення завдання, поставленого вище, виконані наступні кроки:

- 1) Побудована модель зразка для дослідження.
- 2) Задані початкові і граничні умови для моделювання температурних полів в зразку:
 - записані в базу даних характеристики заданого матеріалу $t, (t)$;
 - густина теплового потоку, що поступає на зразок (ліва грань), Вт/м^2 ;
 - температура на охолоджувальній грані (права грань), K .

4.2 Геометричне моделювання

Для вирішення поставленого завдання створена віртуальна модель досліджуваного елементу, тобто задані геометричні умови однозначності. Граничними умовами є геометричні границі області розрахунку, що моделюється. Ці границі формуються при побудові тривимірної моделі пристрою. У програмі SolidWorks-FloWorks можна забезпечити одновимірність температурного поля при будь-яких геометричних розмірах [12].

У програмі SolidWorks створений зразок для випробувань у вигляді елемента прямокутної форми розмірами 200x200 мм із збереженням реальної товщини стінок (рис. 4.1).

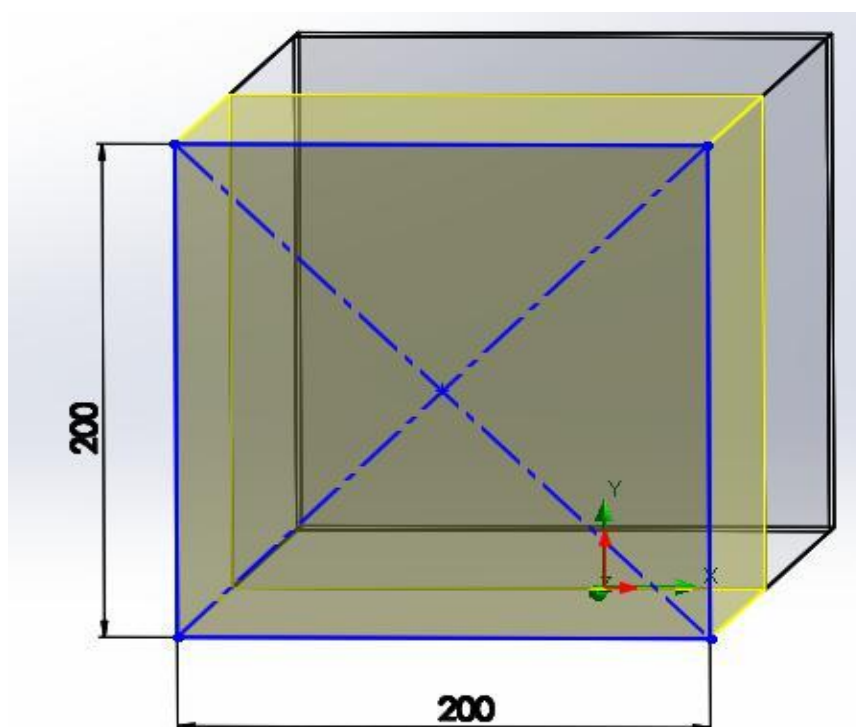


Рисунок 4.1 – Приклад моделі стінки з геометричними розмірами

Граничною умовою є завдання температури зовнішньої стінки, що дорівнює 318 К (рис. 4.2).

На бічних гранях задаємо адіабатичну стінку для забезпечення одновимірності температурного поля і усунення теплових втрат.

Всередині печі підводиться енергія у формі теплоти для нагріву, розплавлення і перегріву розплаву алюмінієвого брухту від нагрівачів. Ця теплота сприймається завантаженим матеріалом (брухтом) і внутрішніми поверхнями стінок. Для процесу моделювання на внутрішній стінці печі використаний показник – густина теплового потоку, Вт/м^2 (рис. 4.3).

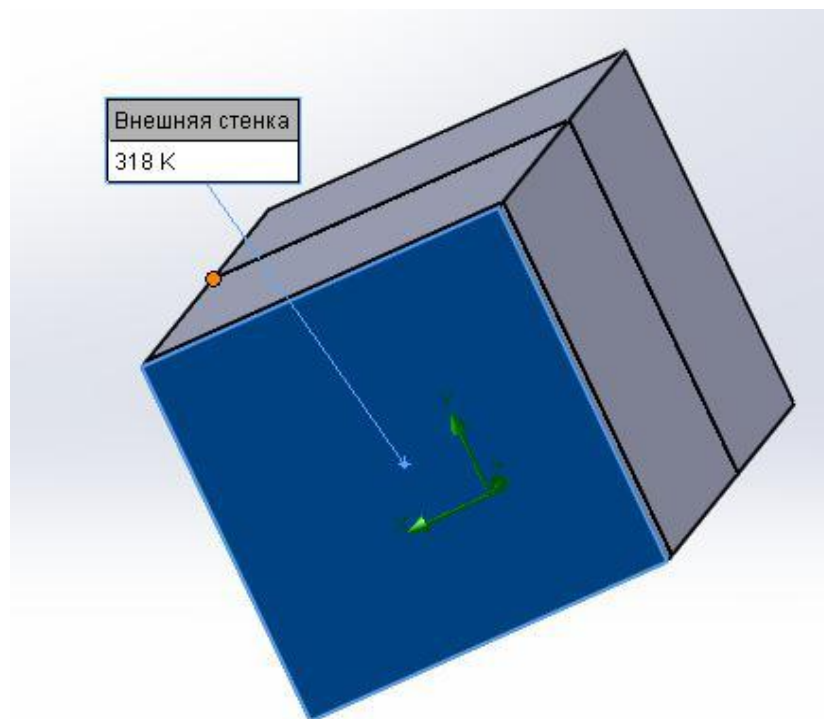


Рисунок 4.2 – Гранична умова – зовнішня стінка з температурою 318 К

В інженерну базу даних були занесені теплофізичні параметри використовуваних матеріалів [1], а також температурні залежності теплопровідності цих матеріалів (див. рис. 4.4-4.9).

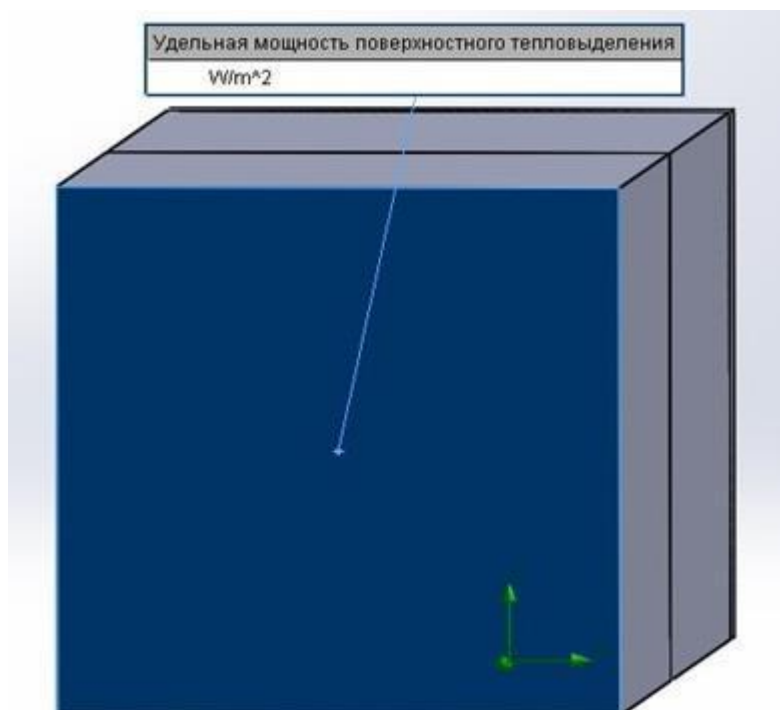


Рисунок 4.3 – Густина теплового потоку на внутрішній стороні стінки

В роботі для побудови моделей стінок печі для переплавки алюмінієвого брухту використовуються матеріали футеровки та теплоізоляційні матеріали, які для різних типів стінок відрізнятимуться лише товщинами шарів.

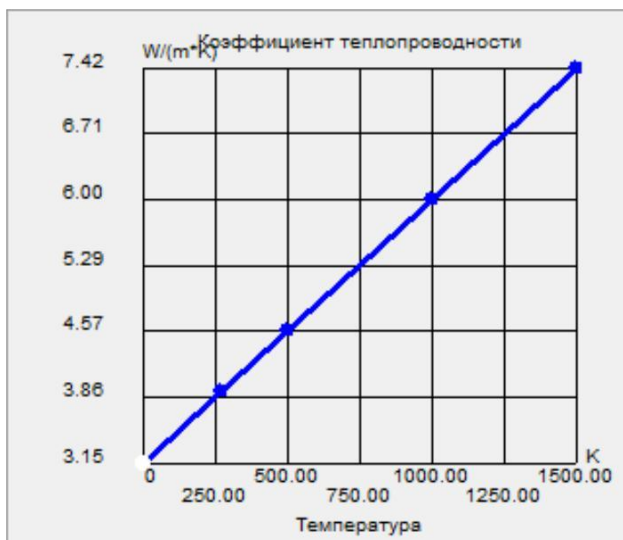


Рисунок 4.4 – Залежність теплопровідності від температури для корунду

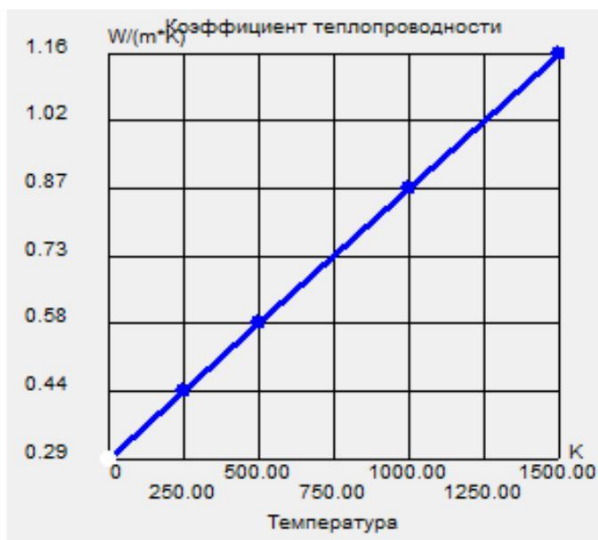


Рисунок 4.5 – Залежність теплопровідності від температури для піношамоту

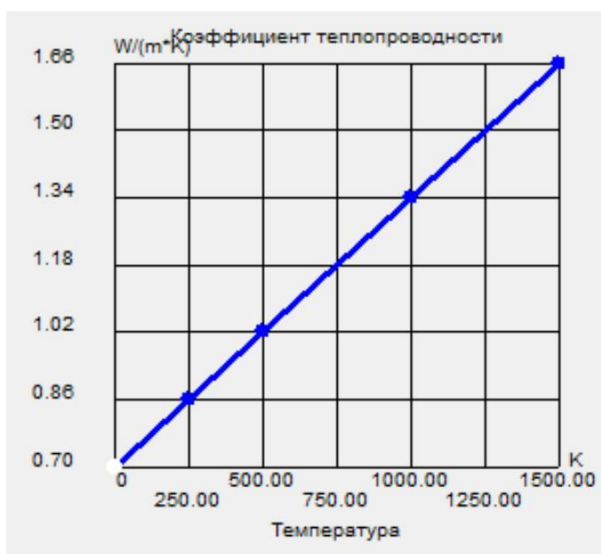


Рисунок 4.6 – Залежність теплопровідності від температури для шамоту

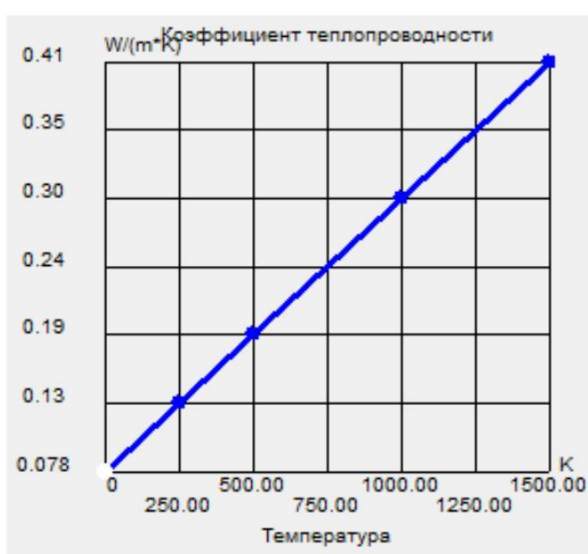


Рисунок 4.7 – Залежність теплопровідності від температури для пінодіатоміту

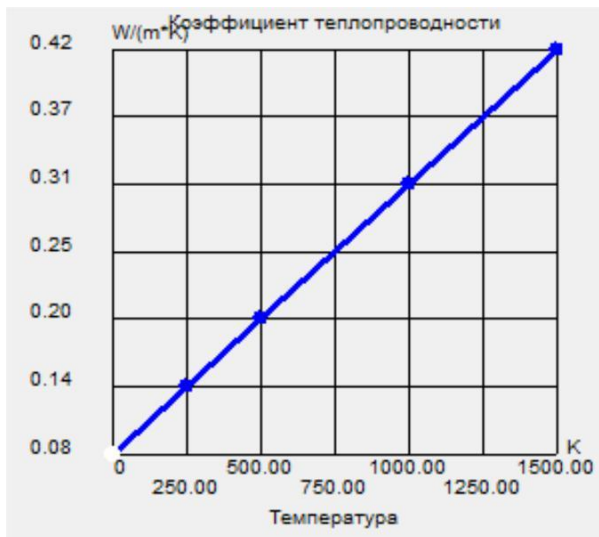


Рисунок 4.8 – Залежність теплопровідності від температури для вермикуліту



Рисунок 4.9 – Залежність теплопровідності від температури для силікату

Вихідні дані для побудови моделі подини:

Товщини шарів:

Корунд (К) b_1 250 мм.

Піношамот (ПШ) b_2 70 мм.

Шамот (Ш) b_3 230 мм.

Пінодіатоміт (ПД) b_4 180 мм.

Силікат кальцію (СК) b_5 300 мм.

Мінеральна вата (МВ) b_6 20 мм.

На правій грані моделі (шар – МВ) використаємо граничну умову – зовнішня стінка з температурою 318 К. На лівій грані – внутрішня сторона печі задаємо значення густини теплового потоку згідно інженерного розрахунку q 136, 9 Вт/м² [1].

Зовнішній вигляд моделі подини показаний на рис. 4.10.

Вихідні дані для побудови моделі склепіння:

Товщини шарів:

Шамот (Ш) b_1 65 мм.

Пінодіатоміт (ПД) b_2 65 мм.

Силікат кальцію (СК) b_3 600 мм.

Вермикуліт (В) b_4 228 мм.

Мінеральна вата (МВ) b_5 20 мм.

На лівій грані – внутрішня сторона печі задаємо значення густини теплового потоку згідно інженерного розрахунку $q = 107 \text{ Вт/м}^2$ [1].

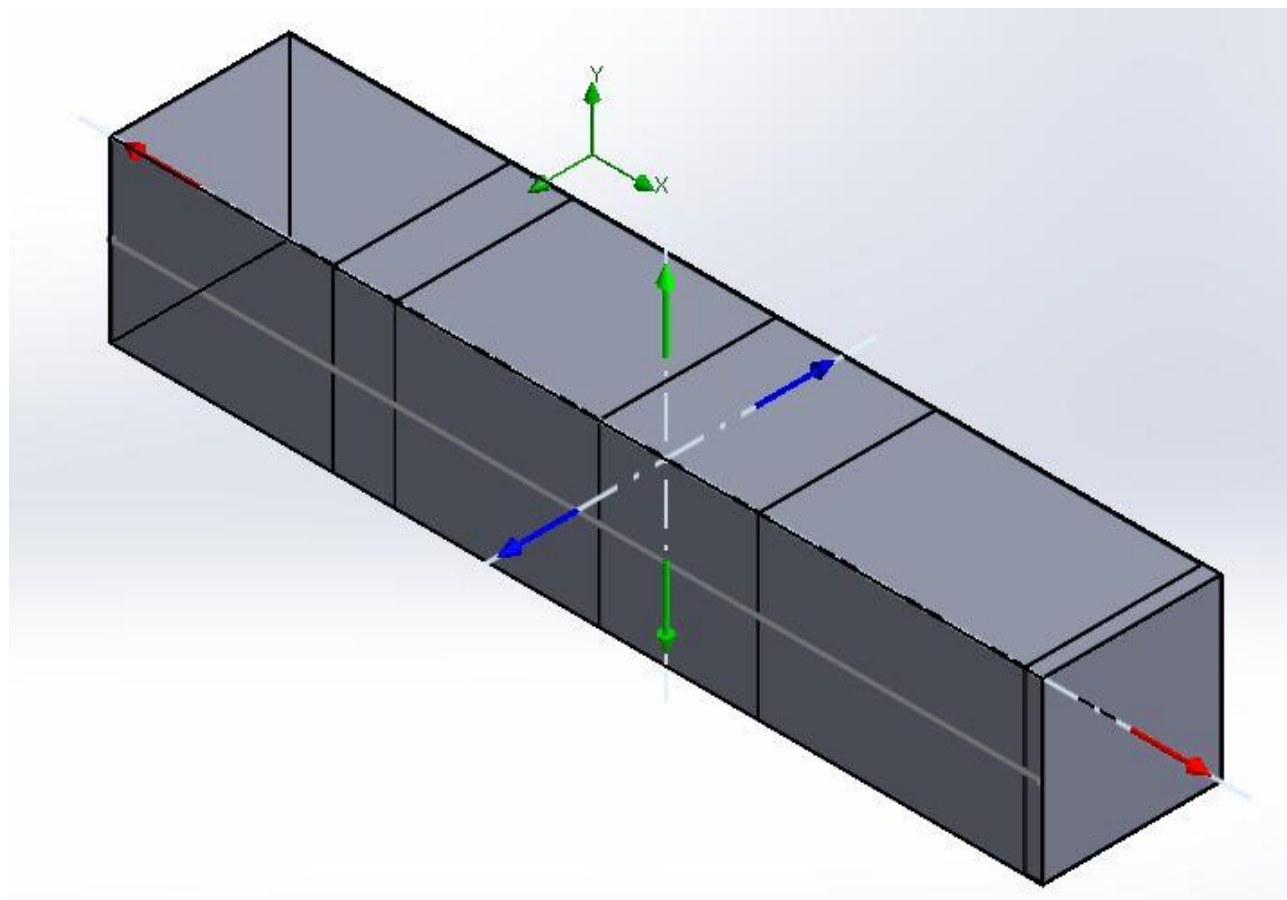


Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд частини стінки подини

В результаті розрахунку отримано наступний розподіл температури по поверхні стінки подини (рис. 4.11) та склепіння (рис. 4.12).

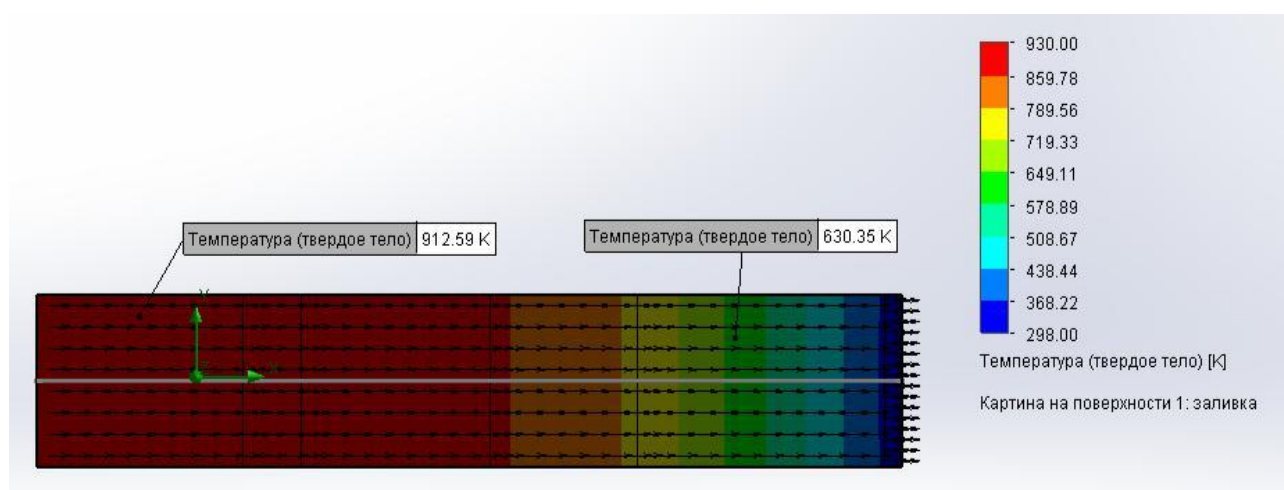


Рисунок 4.11 – Розподіл температури по поверхні подини

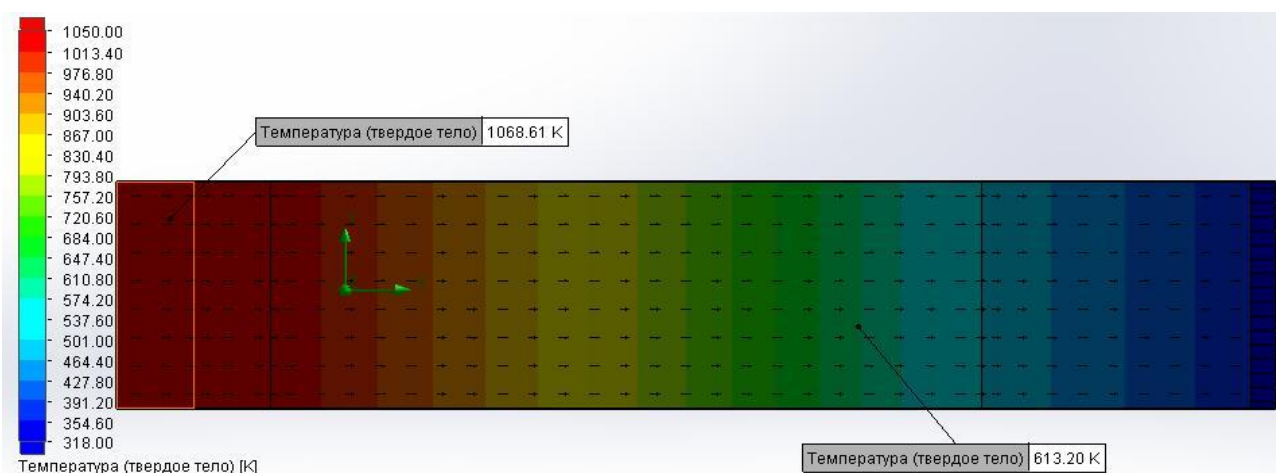


Рисунок 4.12 – Розподіл температури по поверхні склепіння

Вихідні дані для бокової задньої стінки, що знаходиться в розплаві:

Товщини шарів:

Корунд (К) b_1 250 мм.

Піношамот (ПШ) b_2 50 мм.

Шамот (Ш) b_3 230 мм.

Пінодіатоміт (ПД) b_4 180 мм.

Силікат кальцію (СК) b_5 270 мм.

Мінеральна вата (МВ) b_6 20 мм.

На правій грані моделі (шар – МВ) використаємо граничну умову – зовнішня стінка з температурою 318 К. На лівій грані – внутрішня сторона печі задаємо значення густини теплового потоку згідно інженерного розрахунку $q = 148,3 \text{ Вт/м}^2$ [1].

Результати розрахунків температурних полів цієї стінки наведених на рис. 4.13.

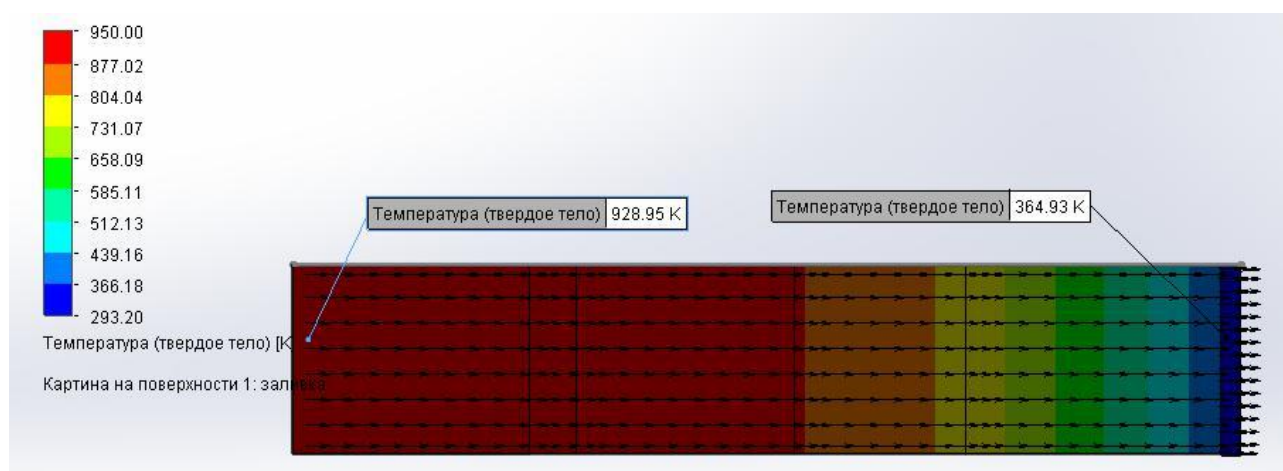


Рисунок 4.13 – Розподіл температури по поверхні бокової задньої стінки, що знаходиться в розплаві

Вихідні дані для торцьової стінки, що знаходиться в розплаві.

Товщини шарів:

Корунд (К) b_1 250 мм.

Піношамот (ПШ) b_2 70 мм.

Шамот (Ш) b_3 115 мм.

Пінодіатоміт (ПД) b_4 115 мм.

Силікат кальцію (СК) b_5 230 мм.

Мінеральна вата (МВ) b_6 20 мм.

На правій грані моделі (шар – МВ) використаємо граничну умову – зовнішня стінка з температурою 318 К. На лівій грані – внутрішня сторона печі задаємо значення густини теплового потоку згідно інженерного розрахунку $q = 185,3 \text{ Вт/м}^2$ [1].

Результати розрахунків температурних полів цієї стінки наведений на рис. 4.14.



Рисунок 4.14 – Розподіл температури по поверхні торцьової стінки, що знаходиться в розплаві

Вихідні дані для торцьової стінки вище рівня розплаву:

Товщини шарів:

Шамот (Ш) b_1 215 мм.

Силікат кальцію (СК) b_2 485 мм.

Мінеральна вата (МВ) b_3 20 мм.

На правій грані моделі (шар – МВ) використовуємо граничну умову – зовнішня стінка з температурою 318 К. На лівій грані – внутрішня сторона печі задаємо значення густини теплового потоку згідно інженерного розрахунку $q = 128,5 \text{ Вт/м}^2$ [1].

Розподіл температур по поверхні торцьової стінки вище рівня розплаву наведений на рис. 4.15.

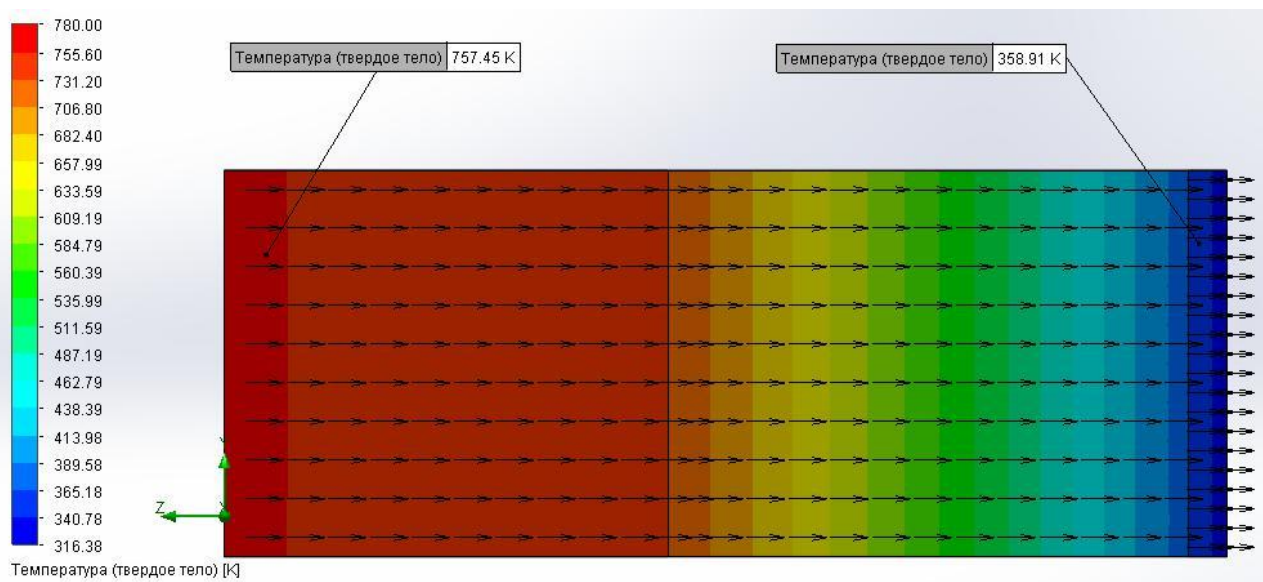


Рисунок 4.15 – Розподіл температури по поверхні торцьової стінки вище рівня розплаву

Вихідні дані для бокової передньої (задньої) стінки вище рівня розплаву:

Товщини шарів:

Шамот (Ш) $b_1 = 295 \text{ мм}$.

Силікат кальцію (СК) $b_2 = 440 \text{ мм}$.

Мінеральна вата (МВ) $b_3 = 20 \text{ мм}$.

На правій грані моделі (шар – МВ) використовуємо граничну умову – зовнішня стінка з температурою 318 К. На лівій грані – внутрішня сторона печі задаємо значення густини теплового потоку згідно інженерного розрахунку $q = 140,2 \text{ Вт/м}^2$ [1].

Розподіл температур по поверхні бокової стінки вище рівня розплаву наведений на рис. 4.16.

4.3 Порівняння результатів отриманих в програмі розробленою НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» з результатами Flow Simulation 2014

Для оцінки адекватності побудованих моделей стінок багат шарових стінок проведемо аналіз отриманих результатів за допомогою методу порівняння. Основним критерієм порівняння обираємо числове значення температур на межі стику футерувальних та теплоізоляційних матеріалів. Порівняння проводимо між двома програмними забезпеченнями:

А) Програмне забезпечення науково-дослідного центру «Ресурсозберігаючі технології» НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Б) Пакет Flow Simulation 2014 програми SolidWorks 2014.

Порівняльні значення температур наведені в таблиці 4.1.

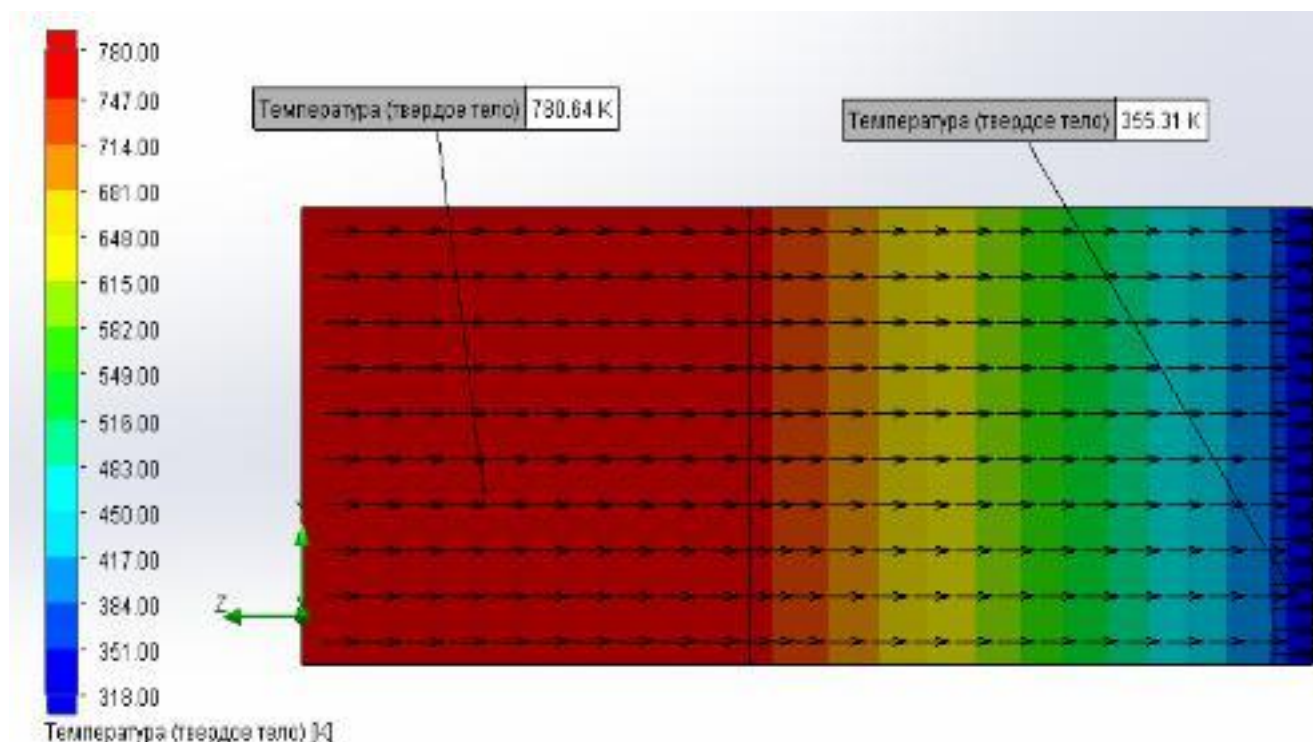


Рисунок 4.16 – Розподіл температури по поверхні бокової стінки вище рівня розплаву

Згідно отриманих значень температур відносна похибка знаходиться в межах 3 – 40 %. Слід зауважити, що деякі значення температур практично збігаються у двох програмах розрахунку (наприклад температури зовнішнього кожуха). Однак є велика розбіжність для торцевих і бокових стінок вище рівня розплаву. В загальній більшості точок на межі стику шарів відносна похибка становить 10 – 35 %. При моделюванні теплових процесів допустимою похибкою в результатах вважається 15 %. Виходячи з вище сказаного отримані результати є незадовільними. Причини та пропозиції з покращення отриманих результатів наведені нижче.

4.4 Висновки до розділу 4

Розроблені моделі багат шарових стінок печі для переплавки алюмінієвого брухту за допомогою програми Solid Works.

Модель виконана у тривимірному вигляді з одновимірним температурним полем у формі прямокутника розмірами 200 x 200 мм внаслідок обмеженого ресурсу ЕОМ.

В якості матеріалів можна використовувати будь-які та задавати і змінювати їх теплофізичні параметри для експериментів. Таке дослідження дає змогу дуже швидко отримувати розподіл

температур по товщині зовнішніх огорожувальних конструкцій печі, а також температури зовнішнього кожуха.

Таблиця 4.1 – Числові значення температур на межі стику футеровочних та теплоізоляційних матеріалів печі

Найменування огороження	Значення температур, °С						
	$t_{\text{вн}}$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	$t_{\text{зовн}}$
1 Подина							
А)	750	743	734	716	629	88	39
Б)	792	776	770	739	663	58	41
2 Склепіння							
А)	952	944	919	277	75	-	36
Б)	948	940	914	263	69	-	35
3 Бокова задня стінка в розплаві							
А)	750	743	736	716	622	93	39
Б)	740	733	726	705	607	81	38
4 Торцьова стінка в розплаві							
А)	750	741	729	717	654	111	43
Б)	770	761	753	718	600	116	54
5 Торцьова стінка вище рівня розплаву							
А)	847	816	85	-	-	-	39
Б)	490	465	96	-	-	-	61
6 Бокова стінка вище рівня розплаву							
А)	847	814	91	-	-	-	40
Б)	518	485	100	-	-	-	61

Згідно з наведеними даними температура зовнішнього кожуха печі не перевищує граничну допустиму, окрім бокових та торцьових стінок вище рівня розплаву.

В загальній більшості точок на межі стику шарів відносна похибка становить 10 – 35 %. Тому рекомендовано в подальших дослідженнях провести розрахунки на вищому рівні точності (наприклад сьомому) та з покращеною градацією розрахункової сітки. Ще однією з причин розбіжностей результатів є неточність у точковому вимірюванні температури за допомогою інструменту «Вимірювання в точці».

Перевагою Flow Simulation 2014 перед програмним забезпеченням НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» є наочне графічне представлення отриманих результатів. При цьому Flow Simulation дозволяє визначати широкий спектр фізичних величин, отримати графічні представлення результатів в залежності від поставленої задачі.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Питання охорони праці враховуються при організації усіх виробничих процесів. Правова основа охорони праці базується на Конституції України, Законі України “Про охорону праці”. Найважливішим принципом державної політики в галузі охорони праці є пріоритет життя та здоров'я людини відносно трудової діяльності.

Варто відмітити, що темою магістерської дисертації є «Підвищення ефективності печей для переплавки алюмінієвого брухту» і в свою чергу потребує застосування засобів обчислювальної техніки в процесі моделювання температурних полів зовнішніх огорожувальних конструкцій печі, тому в даному розділі запропоновані технічні рішення та організаційні заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації засобів обчислювальної техніки, а також технічні рішення та організаційні заходи з гігієни праці та виробничої санітарії при виконанні науково-дослідної роботи. Крім того, в даному розділі запропоновані технічні та організаційні рішення щодо робочих місць в приміщенні науково-дослідної лабораторії, розглянуті питання безпеки в надзвичайних ситуаціях.

5.1. Технічні та організаційні рішення щодо робочих місць в приміщенні науково-дослідної лабораторії

5.1.1 Особливості організації робочих місць в приміщенні науково-дослідної лабораторії та вимоги щодо безпечної експлуатації візуальних дисплейних терміналів персональних електрообчислювальних машин (ВДТ ПЕОМ).

Процеси графічного моделювання проводяться за допомогою персонального комп'ютера (ПК). При роботі на ПК людина піддається впливу іонізуючого, інфрачервоного й ультрафіолетового випромінювань екрана монітора, рівні яких повинні відповідати вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Вимоги до організації робочих місць користувачів ВДТ ПЕОМ в приміщенні науково-дослідної лабораторії:

а) ергономіка робочого місця, його розміри й взаємне розташування робочих місць повинні відповідати ергономічним вимогам і забезпечувати безпеку (ДСТУ ISO 9241:6-2004);

б) при проектуванні робочих місць варто передбачити виконання робіт сидячи або стоячи, при чергуванні сидячи й стоячи;

в) конструкція крісел повинна відповідати ергономічним вимогам. Оптимальне положення тіла працюючого забезпечується відповідною конструкцією робочого місця, а також регулюванням висоти робочої поверхні сидіння, простори й підставки для ніг.

Щоби забезпечити точне та швидке зчитування інформації в зоні найкращого бачення, площина екрана монітора виставлена перпендикулярно нормальній лінії зору. При цьому передбачена можливість переміщення монітора навколо вертикальної осі в межах $\pm 30^\circ$ (справа наліво) та нахилу вперед до 85° і назад до 105° з фіксацією в цьому положенні. Клавіатура розміщена на поверхні столу на відстані 100-300 мм від краю. Кут нахилу клавіатури до столу обрано в межах від 5° до 15° так, що зап'ястя на долонях рук розташовуються горизонтально до площини столу. Таке положення клавіатури зручне для праці обома руками.

Робочі місця з ПК розташовано відносно від стіни з вікнами на відстані не менше 1,5 м, від інших стін — на відстані 1 м, відстань між собою - не менше ніж 1,5 м. Причому так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски з поверхні екранів ПК передбачені сонцезахисні жалюзі.

5.1.2 Вимоги з ергономіки до організації робочих місць користувачів ВДТ ПЕОМ

Робоче місце - це частина простору, в якому інженер здійснює трудову діяльність, і проводить велику частину робочого часу. Розглянемо питання та заходи з ергономіки.

Згідно ГОСТ 12.2.032-78 та (ДСТУ ISO 9241:6-2004) конструкція робочого місця і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам.

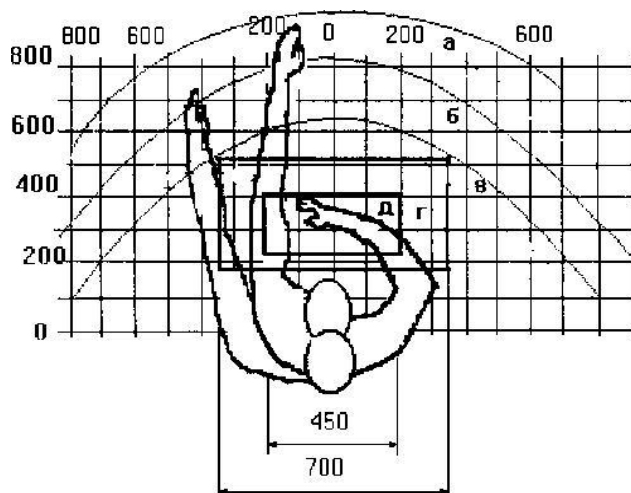
Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця дослідника повинні бути дотримані наступні основні умови, крім попередньо згаданих:

- оптимальне розміщення устаткування, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення;

Головними елементами робочого місця дослідника є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи організоване відповідно до ГОСТ 12.2.032-78 (рисунок 5.1).

Розглянемо оптимальне розміщення предметів праці і документації в зонах досяжності рук:

- дисплей розміщується в зоні а (у центрі);
- клавіатура - у зоні г / д;
- системний блок розміщується в зоні б (зліва);
- принтер знаходиться в зоні а (праворуч);



а - зона максимальної досяжності; б - зона досяжності пальців при витягнутій руці; в - зона легкої досяжності долоні; г - оптимальний простір для грубої ручної роботи; д - оптимальний простір для тонкої ручної роботи

Рисунок 5.1 – Зони досяжності рук в горизонтальній площині

–документація: в зоні легкої досяжності долоні - в (ліворуч) - література і документація, необхідна при роботі;

– у висувних ящиках столу - література, якою використовується не постійно.

Параметри робочого місця вибираються відповідно до антропометричним характеристиками. При використанні цих даних у розрахунках варто виходити з максимальних антропометричних характеристик (рисунок 5.2).

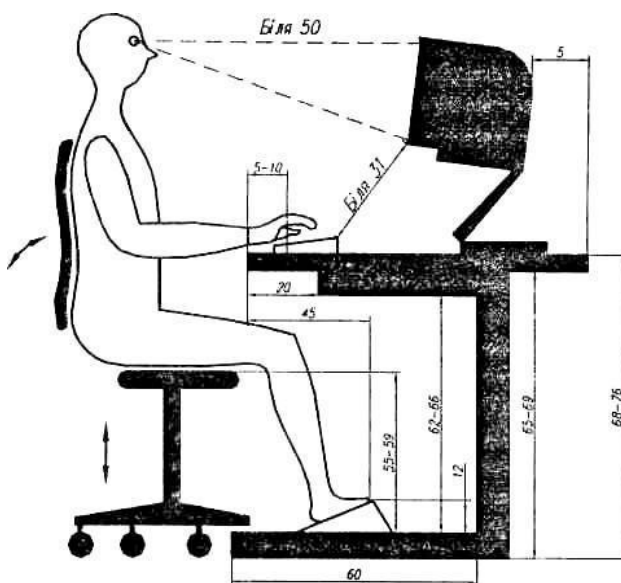


Рисунок 5.2 - Оптимальні метричні параметри робочого місця (мм)

5.1.2 Електробезпека

Напруга в електромережі приміщення становить 220 В, струм змінний. Мережа трифазна, чотирипровідна, із заземленою нейтраллю. Розетки заземлені, які відповідають нормам ПУЕТ та НПАОП 0.00-1.28-10. Електропроводка прокладена в закритих ізолюючих коробах під підлогою. Споживачами електроенергії є ЕОМ, дисплеї, принтери, освітлювальні прилади.

Характеристика використовуваного устаткування за споживанням електроенергії:

– Монітори Samsung C23A750X та Samsung SyncMaster 970P напруги 100-240 В, сили струму 1.2 А, частоти 85 Гц та 90 Гц відповідно;

– Системний блок моделі IBM PC Pentium 4 напругою 220 В, частотою 50 Гц, силою струму 1 А;

– Корпус моніторів виконаний з пластмаси, що захищає користувача від можливої поразки струмом при дотику до нього. Те саме стосується і принтерів та системних блоків. Для уникнення перегріву системного блоку та монітору вентиляційні отвори завжди не загороджені сторонніми предметами.

За способом захисту людини від ураження електричним струмом згідно ГОСТ 12.2.007.0- 75 блоки ПЕОМ та периферійні пристрої відносяться до I та II класів з електрозахисту.

Робоче приміщення відноситься до сухих, оскільки відносна вологість у приміщеннях не перевищує 60%.

За ступенем небезпеки ураження електричним струмом дане приміщення відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки, тому що в ньому відсутні умови, які створюють підвищену або особливу небезпеку:

- вологість;
- струмопровідний пил;
- хімічноактивне середовище;
- струмопровідна підлога;
- підвищена температура;

– можливість одночасного дотику до заземлених металоконструкцій будівлі з одного боку, та до металевих частин електрообладнання, з іншого боку.

ЕОМ, дисплеї, освітлювальні прилади, електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту відповідають класу зони за ПВЕ, мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів.

Робочі стенди виготовлені із спеціального матеріалу, що робить поразку електричним струмом людини, при дотику до них практично неможливим. Тобто, спеціальних заходів для електробезпечності застосовувати не потрібно.

В приміщенні розташовується 2 персональних ЕОМ, тому для прокладення трипровідникового захищеного проводу використано гнучкі металеві рукави та на помітному,

доступному місці встановлено аварійний резервний вимикач. Таким способом реалізована електромережа штепсельних розеток для живлення персональних ЕОМ, периферійних пристроїв, тощо. Самі розетки монтуються на негорючих пластинах з урахуванням вимог «Правил використання електроустановок» (ПВЕ) та Правил пожежної безпеки в Україні та виконані за магістральною схемою.

Заземлення відповідає вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів”.

Для протирання підлоги застосовують рідини, пара яких не утворює вибухопожежонебезпечних сумішей з повітрям та не викликає корозії контактів електричних з'єднань.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом для даного приміщення є забезпечення недоступності струмопровідних частин, що знаходяться під напругою, від випадкового дотику, організація безпечної експлуатації електронагрівальних приладів а також занулення устаткування з використанням автоматів струмового захисту. При наявності занулення замикання фази на корпус перетворюється в одноразове коротке замикання струму, від якого спрацьовує пристрій максимального струмового захисту і вимикає пошкоджений електроприлад. Оскільки в приміщеннях зберігаються горючі матеріали, то електрична проводка в приміщенні прихована під шаром штукатурки 2,5 см.

5.1.3 Розрахунок електромережі на вимикаючу здатність

Розрахунок електромережі на вимикаючу здатність включає знаходження величини струму короткого замикання (КЗ) і розрахунок номінального струму спрацювання пристрою максимального струмового захисту.

Вихідні дані для розрахунку:

- $U_{\phi} = 220 \text{ В}$ – фазна напруга;
 - Кабель трьохжильний з площею перерізу однієї жили $S_{\phi} = 1,5 \text{ мм}^2$, матеріал – алюміній ($0,031 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$);
 - $L=200 \text{ м}$ – відстань від трансформатора до споживача.
- 1) Активний опір фазного та нульового проводів відповідно, Ом

$$r_{\text{н}} = r_{\phi} = \frac{L}{S_{\phi}} ; \quad (5.1)$$

$$r_{\text{н}} = r_{\phi} = \frac{0,031 \cdot 200}{1,5} = 4,13 \text{ Ом.}$$

- 2) Струм однофазного КЗ, А, обчислюється за формулою

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{Ф}}}{r_{\text{Ф}} + r_{\text{Н}} + r_{\text{У}}}, \quad (5.2)$$

де $r_{\text{У}} 0,3 \text{ Ом}$ - розрахований опір трансформатора потужністю 250 Вт.

Тоді за формулою (5.2)

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{220}{4,13 + 4,130,3} = 25,7 \text{ А.}$$

3) Номінальний струм спрацювання автомату струмового захисту розраховується за формулою

$$I_{\text{НОМ}} \leq I_{\text{КЗ}} / K, \quad (5.3)$$

де K – необхідна кратність струму КЗ до струму спрацювання автомату струмового захисту. Тоді за формулою (5.3)

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{25,7}{1,4} = 18,36 \text{ А.}$$

З розрахунків видно, що при однофазному КЗ номінальний струм спрацювання автомату захисту повинен бути менше 18 А (автомати, що використовуються у роботі повинні мати $I_{\text{НОМ}} 15 \text{ А}$).

4) При однофазному КЗ нульовий провід і з'єднаний з ним корпус електроустановки за час спрацювання максимального струмового захисту знаходяться під напругою $U_{\text{ДОТ}}$ відносно землі

$$U_{\text{ДОТ}} = I_{\text{КЗ}} \cdot r_{\text{Н}} \quad (5.4)$$

Тоді за формулою (5.4)

$$U_{\text{ДОТ}} = 25,7 \cdot 4,13 = 106,1 \text{ В.}$$

Розрахована напруга $U_{\text{ДОТ}} < U_{\text{ДОТ.ДОП}}$ у відповідності з ГОСТ 12.1.038-88 при $t < 0,2 \text{ с}$ ($U_{\text{ДОТ.ДОП}} = 250 \text{ В}$).

5.2. Технічні рішення та організаційні заходи з гігієни праці та виробничої санітарії при виконанні науково-дослідної роботи

До основних факторів, що визначають стан санітарно-гігієнічних умов праці в науково-дослідній лабораторії відносяться наступні фактори:

- мікроклімат;
- освітлення;
- шум;
- ергономіка,
- електромагнітне випромінювання,
- ультрафіолетове випромінювання.

Захист від шуму не розглядається, оскільки рівень шуму, що має місце при виконанні науково-дослідної роботи не здатний зашкодити здоров'ю людини. Виробничі вібрації відсутні, тому їх вплив також не розглядається.

5.2.1 Мікроклімат робочої зони

Мікроклімат у виробничих умовах визначається наступними параметрами: температурою повітря, відносною вологістю повітря, швидкістю руху повітря й інтенсивністю теплового випромінювання на робочому місці, температурою поверхні.

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюють оптимальне й припустиме значення параметрів мікроклімату залежно від періоду року й категорії робіт (таблиця 5.1). У таблиці наведені оптимальні й припустимі значення параметрів мікроклімату для категорій тяжкості робіт «Іа» (роботи, виконувані сидячи й не потребуючі фізичної напруги при витраті енергії не більше 120 ккал/годину).

У приміщенні в якості опалювального приладу використовується сталева 11-ти секційна батарея центрального опалення для підтримки нормальної температури повітря в холодну пору року.

Таблиця 5.1 – Оптимальні й допустимі параметри (для постійного робочого місця) мікроклімату в приміщенні.

Параметри	Холодний період		Теплий період	
	оптимальні	допустимі	оптимальні	допустимі
Температура $^{\circ}\text{C}$	22-24	21-25	23-25	22- 28
Відносна вологість, %	40-60	80	40-60	75
Швидкість руху повітря, м/с	0,1	0,1	0,1	0,1-0,2

Для підтримки необхідних параметрів повітря в приміщенні запроектована припливно-витяжна вентиляція. Також використовується природна вентиляція. У приміщенні є вікно, яке можна відкривати, якщо буде потреба в теплий період. Шкідливі речовини в приміщенні не зберігаються й не використовуються.

5.2.2. Природне освітлення

У приміщенні передбачена система однобічного природного освітлення через застеклений віконний проріз. При природному освітленні нормується не абсолютне значення освітленості, а коефіцієнт природного освітлення (КПО), який визначається за формулою

$$K_{\text{ПО}} = e_p \frac{E_{\text{зов}}}{E_{\text{вн}}} 100, \quad (5.5)$$

де $E_{\text{зов}}$ – зовнішня горизонтальна освітленість в похмуру погоду; $E_{\text{вн}}$ – природна освітленість на клавіатурі.

Розрахункове значення КПО для м. Києва обчислюємо за формулою

$$e_p = e_n \cdot m, \quad (5.6) \text{ де } e_n=1,5 \% \text{ – нормативне значення коефіцієнта природного освітлення згідно ДБН В.2.5-28-}$$

06;

$m=0,85$ – коефіцієнт світлового клімату.

Визначимо необхідну площу світлового прорізу, який забезпечує нормативне значення КПО в робочій зоні дослідника, за формулою

$$100 \frac{S_{\text{вікн}}}{S_{\text{п}}} \frac{e_{\text{п}} k_{\text{зд}}}{r_1} k_{\text{з}} \quad (5.7)$$

де $S_{\text{вікн}}$ – площа світлових прорізів, м^2 ;

$S_{\text{п}}$ – площа підлоги приміщення, м^2 ($S_{\text{п}}=30 \text{ м}^2$);

$e_{\text{п}}$ – нормоване значення КПО;

$k_{\text{зд}}$ – світлова характеристика вікон;

$k_{\text{з}}$ – коефіцієнт, що враховує затінення вікон іншими будинками

($k_{\text{зд}}=1,2$); $k_{\text{з}}$ – коефіцієнт запасу ($k_{\text{з}}=1,5$);

r_1 – коефіцієнт, що враховує підвищення КПО при бічному освітленні через світло, відбитого від поверхонь приміщення й підстильного шару, що прилягає до будинку, ($r_1=1,1$);

α – загальний коефіцієнт світлопроникнення,

$$\alpha = 0,12345, \quad (5.8)$$

де α_1 – коефіцієнт світловипускнення матеріалу, ($\alpha_1=0,8$);

α_2 – коефіцієнт, що враховує втрати світла у віконних прорізах, ($\alpha_2=0,75$);

α_3 – коефіцієнт, що враховує втрати світла в несучих конструкціях, ($\alpha_3=1$);

α_4 – коефіцієнт, що враховує втрати світла в сонцезахисних пристроях, ($\alpha_4=0,9$);

α_5 – коефіцієнт, що враховує втрати світла в захисній сітці, установленій під ліхтарями, $\alpha_5=0,9$;

Тоді

$$S_{\text{вікн}} = \frac{0,5 \cdot 1,5 \cdot 7}{0,8 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,91,1} \cdot 1,2 \cdot \frac{30}{100} 2,9 \text{ м}^2.$$

Приймаємо, що $S_{\text{вікн}}=3 \text{ м}^2$ (вікно розміром $1700 \times 1800 \text{ мм}$).

5.2.3 Штучне освітлення

У вечірній час, та в похмуру погоду у приміщенні використовується система штучного освітлення.

Приміщення освітлюється за допомогою світлодіодних ламп, змонтованих в алюмінієвому профілі. Освітленість визначатимемо за методом лінійних ізолюкс.

1) Розрахункова кількість ламп, необхідних для нормального освітлення приміщення

$$N_p = \frac{E_{об} S K_z Z}{n \Phi_l}, \quad (5.9)$$

де $E_{об}=500$ лк - нормована мінімальна

освітленість; N_p - кількість світильників у ряду;

N - кількість світильників, передбачена ще до розрахунку

$N=6$; n - кількість ламп у світильнику; $n=3$

Φ_l - світловий потік лампи, лм (або сумарний світовий потік ламп в багатолампових освітлювачах); K_z - коефіцієнт запасу, враховує зниження світлопропускання вікон і середовища у приміщенні, $K_z=1,2-1,5$;

η - коефіцієнт використання світлового потоку;

$Z=1,1$ – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

S - площа освітлення приміщення, m^2 .

Для світлодіодних ламп, встановлених в освітлювачах, середній світловий потік 1 лампи становить 450 лм.

2) Визначимо показник приміщення за формулою

$$i = \frac{l b}{h (l + b)}, \quad (5.10)$$

де $l=6$ м – довжина приміщення;

$b=3$ м – ширина приміщення;

$h=3$ м – висота підвісу світильників.

Тоді за формулою (5.10)

$$i = \frac{6 \cdot 3}{3 (6 + 3)} = 0,67.$$

3) Коефіцієнт використання світлового потоку залежить від коефіцієнтів випромінювання стелі, стін, робочих поверхонь, показника приміщення. Коефіцієнти відбиття для стін і стелі приймаємо $\alpha = \rho = 0,7$ (білі). Згідно таблиці 6.2 [13] знаходимо значення $\eta=0,39$.

4) Площа приміщення, яке освітлюється:

$$S = l b. \quad (5.11)$$

$$S = 63,18 \text{ м.}^2$$

Розрахункова кількість ламп для нормального освітлення приміщення за формулою (5.9)

$$N_p = \frac{500 \cdot 18,5 \cdot 1,1}{38100 \cdot 0,39} \approx 9 \text{ шт.}$$

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях регламентується планом локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій (ПЛАС). Основними складовими ПЛАС є розробка технічних та організаційних рішень з пожежної безпеки та заходів щодо оповіщення та евакуації персоналу лабораторії у надзвичайних ситуаціях.

5.3.1 Технічні рішення та організаційні заходи щодо організації ефективної роботи системи оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій.

Для підвищення безпеки в надзвичайних ситуаціях (НС) пропонується встановлення системи оповіщення (СО) виробничого персоналу.

Оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення НС здійснюється відповідно до вимог НАПБ А.01.003-2009.

При обладнанні виробничих будівель системою оповіщення, їх необхідно поділяти на зони оповіщення з урахуванням об'ємно-планувальних рішень будинків, шляхів евакуації, поділення на протипожежні відсіки тощо, а також з урахуванням вимог, що наведені в примітці 1 таблиці Е.1 додатка Е до ДБН В.1.1-7-2002.

Як правило, СО вмикається автоматично від сигналу про пожежу, який формується системою пожежної сигналізації або системою пожежогасіння. Також з приміщення оперативного (чергового) персоналу СО (диспетчера пожежного поста) слід передбачати можливість запуску СО вручну, що забезпечує надійну роботу СО не тільки при пожежі, а і у разі виникнення будь-якої іншої НС.

Згідно з вимогами ДБН В.1.1-7-2002 необхідно забезпечити можливість прямої трансляції мовного оповіщення та керівних команд через мікрофон для оперативного реагування в разі зміни обставин або порушення нормальних умов евакуації виробничого персоналу.

Оповіщення виробничого персоналу про НС здійснюється за допомогою світлових та/або звукових оповіщувачів - обладнуються всі виробничі приміщення.

Текст оповіщення людей про НС повторюється безперервно протягом всього часу евакуації людей. Перед подачею мовного повідомлення повинен подаватись сигнал привертання уваги.

Кількість звукових та мовлевих оповіщувачів, їх розміщення та потужність повинні забезпечувати необхідний рівень звуку в усіх місцях постійного або тимчасового перебування виробничого персоналу.

У місцях, де є небезпека механічного ушкодження оповіщувачів, повинен бути забезпечений

їх захист, що не порушує працездатності оповіщувачів. Настінні звукові та мовні оповіщувальні пристрої кріпляться на висоті не менше 2,2 м від підлоги, при цьому відстань від стелі до оповіщувача повинна становити не менше 150 мм.

Допускається використовувати евакуаційні світлові покажчики, що автоматично вмикаються при отриманні СО командного імпульсу про початок оповіщення про НС та аварійному припиненні живлення робочого освітлення.

Електропостачання, заземлення, занулення, вибір та прокладання мереж оповіщення приймаються згідно з вимогами до систем пожежної сигналізації за ДБН В.2.5-56:2014.

Електропостачання СО здійснюється за I категорією надійності згідно з "Правилами влаштування електроустановок" (ПУЕ) від двох незалежних джерел енергії: основного - від мережі змінного струму, резервного - від акумуляторних батарей, тощо.

Тривалість роботи СО від резервного джерела енергії у черговому режимі має бути не менше ніж 24 години.

Звукові оповіщувачі повинні відповідати вимогам ДСТУ EN 54-3:2003 "Системи пожежної сигналізації. Частина 3. Оповіщувачі пожежні звукові".

Звукові сигнали СО повинні забезпечувати загальний рівень звуку не менше 75 дБ на відстані 3 м від оповіщувача, але не більше 120 дБ у будь-якій точці виробничого приміщення. При цьому для забезпечення чіткої чутності звукові сигнали СО повинні забезпечувати рівень звуку не менше ніж на 15 дБ вище допустимого рівня звуку постійного шуму у захищуваному приміщенні. Вимір проводиться на висоті 1,5 м від підлоги.

5.3.2 Обов'язки та дії персоналу і населення при НС

У разі виявлення ознак пожежі працівник, який їх помітив, повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв'язку органи державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), вказати при цьому адресу, кількість поверхів, місце виникнення пожежі, наявність людей, а також своє прізвище;
- повідомити про пожежу керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;
- організувати оповіщення людей про пожежу;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації пожежі з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установи, яким повідомлено про виникнення пожежі, повинні:

- перевірити, чи викликані підрозділ ДСНС та Державна пожежна охорона;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію та їх рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації пожежі;

- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації пожежі;
- організувати зустріч підрозділів ДСНС та Державної пожежної охорони, надати їм допомогу у локалізації та ліквідації пожежі.

5.3.3 Пожежна безпека

Можливими причинами пожежі в приміщенні є несправності електроустаткування, коротке замикання в системі електроживлення, а також порушення протипожежного режиму (використання побутових нагрівальних приладів, паління).

Електричні кабелі електроустаткування вибираються за струмовим навантаженням та з використанням важкозаймистої ізоляції $r_{із} = 1$ кОм/В.

Електропроводка має бути прокладена в захисних коробах з матеріалів, що не згоряють. У електричних схемах електроустаткування передбачений захист від короткого замикання (автомати струмового захисту). У приміщенні підтримується температура набагато нижче за температуру самозаймання речовин, що знаходяться в даному приміщенні.

Технічні рішення системи протипожежного захисту спрямовані на обмеження поширення пожежі, захист людей (у першу чергу) і матеріальних цінностей.

Приміщення має бути обладнане первинними засобами пожежогасіння (вогнегасник ОП-порошковий). При пожежі в електроустановках, що знаходяться під напругою (клас пожежі «Е»), рекомендується застосовувати порошки типу СІ, що являють собою зерна силікагелю, насичені галоїдвуглецевими рідинами. Також згідно з ДСТУ 3675-98 використовуються вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-8, призначені для гасіння пожежі, що виникла в електроустановках, що знаходяться під напругою (тривалість випуску заряду близько 15 с, довжина струменя 4 м, дозволяють вести гасіння без відключення установки). Кількість, розміщення та умови зберігання вогнегасників мають відповідати нормативним вимогам.

Має бути працездатний пожежний зв'язок і електропожежна сигналізація яка, відповідно до вимог ДБН В.2.5-56:2014 має сповіщати про виникнення пожежі і забезпечувати оперативне керування пожежними командами під час пожежі. Електрична пожежна сигналізація складається з оповіщувачів, встановлених у приміщенні і підключених до прийомної станції з живленням від мережі змінного струму 220 В. Передбачений також протипожежний водопровід. Згідно ДБН В.1.1-7-2002 межа вогнестійкості будинку має складати 0,5 години. Евакуаційним виходом із приміщення є дверний проріз, що веде в коридор, з якого є два виходи з будівлі. В цьому ж коридорі знаходиться пожежний щит, у якому мають бути лопата, сокира, відро, багор.

В архітектурно-планувальних рішеннях будівлі мають передбачаються евакуаційні виходи, в тому числі аварійні. Двері приміщення повинні відкриватися назовні, ширина дверей не менше 0,8

м, висота не менше 2 м, ширина коридору – 2 м.

5.4 Висновки до розділу 5

Були розглянуті заходи, спрямовані на організацію безпечної роботи в приміщенні науково-дослідної лабораторії (безпечна експлуатація ВДТ ПЕОМ, електробезпека).

Розглянуті параметри для необхідного мікроклімату в робочій зоні дослідника з метою збереження його здоров'я і забезпечення максимальної продуктивності праці.

Проведені розрахунки стосовно необхідного рівня виробничої освітленості в робочій зоні дослідника.

У приміщенні передбачена система однобічного природного освітлення через застелений віконний проріз. Необхідна площа світлового прорізу, який забезпечує нормативне значення КПО в робочій зоні дослідника складає $S_{\text{вікн}}=3 \text{ м}^2$.

Приміщення в похмуру погоду освітлюється за допомогою світлодіодних ламп, змонтованих в алюмінієвому профілі. Необхідна кількість ламп повинна дорівнювати 9 шт.

В науково-дослідній лабораторії передбачені заходи з пожежної безпеки та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

6 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап, як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва, впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає від 10% до 20%. Ідея стартап-проекту, взята окремо, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів [14].

Для запуску будь-якого стартапу необхідно зібрати гіпотези бізнес-моделі. Найбільш популярним і актуальним інструментом бізнес-моделювання на сьогоднішній день є шаблон бізнес моделі розроблений Олександром Остервальдером та Івом Піньє. Даний шаблон був представлений в роботі «Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора» [15] і на даний момент використовується компаніями різного рівня, від стартапів до транснаціональних корпорацій.

Шаблон (або як його іноді називають: канва, макет) – це універсальна мова опису, представлення, аналізу і перетворення бізнес-моделей. Для того, щоб просто і наглядно описати і представити діяльність організації в даному розділі будемо використовувати шаблон бізнес-моделі Олександра Остервальдера та Іва Піньє.

6.1 Опис блоків бізнес-моделі

Бізнес-модель Олександра Остервальдера та Іва Піньє складається з дев'яти структурних блоків (рисунок 6.1) [15]

- 1) Споживацькі сегменти
- 2) Ціннісна пропозиція
- 3) Канали збуту
- 4) Взаємовідносини з клієнтами
- 5) Потоки надходження доходів

- 6) Ключові ресурси
- 7) Ключові види діяльності
- 8) Ключові партнери
- 9) Структура витрат

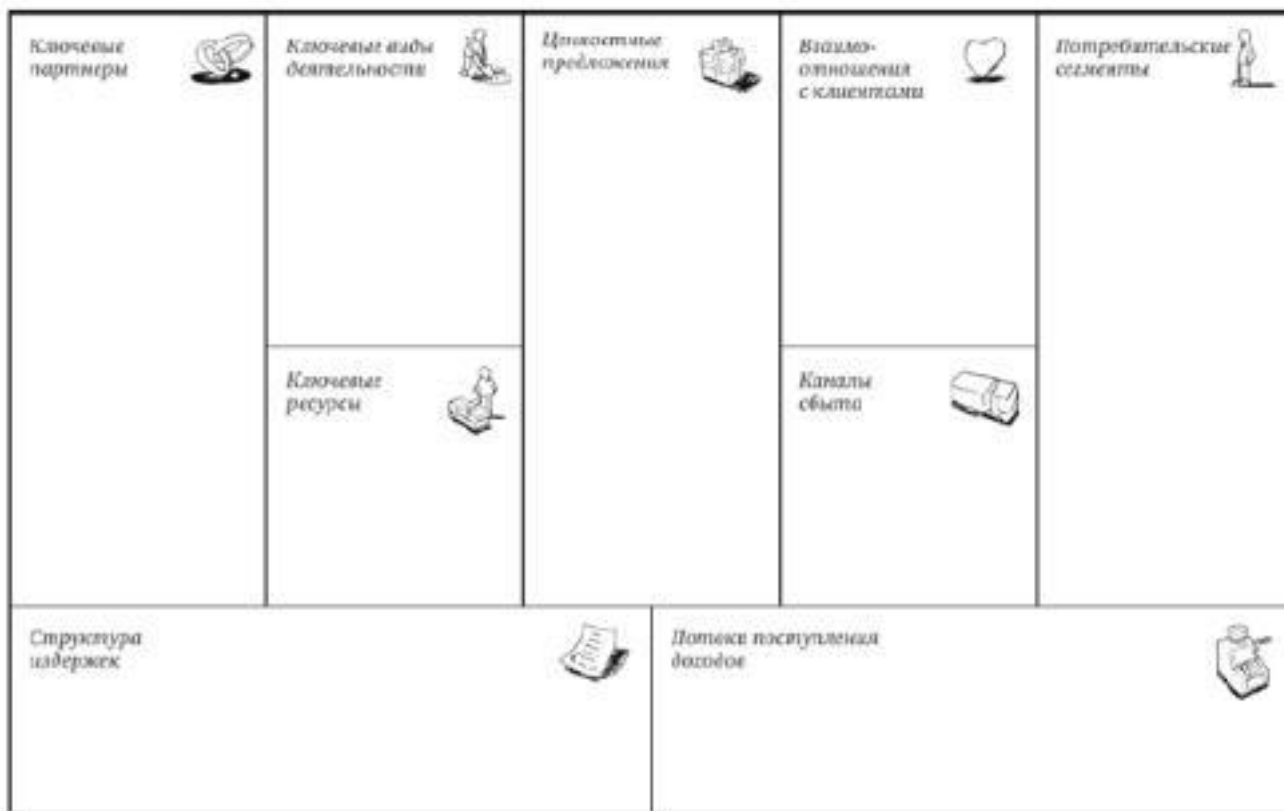


Рисунок 6.1 – Шаблон бізнес-моделі

Основною ідеєю стартапу є надання послуг технічного розрахунку та надання консультацій з підвищення рівня енергетичної ефективності печей для переплавки алюмінієвого брухту у порівнянні з нині існуючими печами для переплавки алюмінієвого брухту.

Базовим споживацьким сегментом є нішевий ринок кольорових металів, а саме ринок виробництва алюмінію з брухту.

Нижче перерахуємо елементи, які складають цінність товару для кінцевого споживача:

- 1) Підвищена ефективність

За рахунок заміни теплоізоляції з пінодіатоміта на силікат кальція, а також влаштування двох форкамер замість однієї та зменшення терміну їх відкриття призводить до зменшення витрат теплоти в циклі плавки приблизно у 2 рази;

- 2) Економічність

Розрахунки енергетичної та економічної ефективності переводу печі з електричного нагріву на газовий показують, що для газового нагріву витрати зменшуються на 9 – 10 % порівняно з електричним.

3) Зменшення витрат

Розроблена конструкція печі з нахиленим склепінням, для якої порівняно з традиційним зменшується термін плавки у середньому на 11 %, а ККД підвищується на 7 %.

4) Зниження ризику

Суттєвою цінністю є гарантований рівень обслуговування після здійснення купівлі послуги.

5) Зручність застосування

Появляється завдяки можливості використання печі для переплавки алюмінієвого брухту замість раніше встановлених печей заданою місткістю 6 т.

Блок каналів збуту описує, як компанія взаємодія зі споживацькими сегментами і доносить до них свої ціннісні пропозиції.

Канали збуту, розповсюдження і продаж складають систему взаємодії компанії зі споживачами. Ці канали – це точки контакту споживача з продавцем – виконують ряд функцій, а саме:

- Підвищують рівень освідомлення споживача;
- Допомагають оцінити ціннісну пропозицію;
- Дозволяють споживачу купувати товари або послуги;
- Знайомлять споживача з ціннісною пропозицією;
- Забезпечують після продажне обслуговування.

Основним каналом збуту будуть продажі через торгових агентів, однак вони не єдині. Ще одним варіантом є партнерські канали – непрямі канали збуту, які представлені через партнерські сайти. Партнерський канал приносить менший прибуток, але допоможе досягти більшого охопту ринку і дає переваги за рахунок сильних сторін партнера у порівнянні з прямими каналами збуту, організація і управління яких обходитиметься дорожче.

Взаємовідносини з клієнтами будуть проходити в рамках персональної підтримки. Даний тип побудований на особистих контактах і клієнт може спілкуватися напряму з представником компанії, отримуючи від нього допомогу в процесі купівлі і після неї.

Блок потоків надходження доходів включає матеріальний прибуток, який компанія отримує від кожного споживацького сегменту.

В бізнес-моделі можуть здійснюватися два типи потоків доходів:

- 1) дохід від разових угод;
- 2) регулярний дохід від періодичних платежів, отримуваних від клієнта за ціннісну пропозицію або після продажне обслуговування.

Основним потоком доходів виділимо дохід від разових угод при цьому механізм ціноутворення будемо на основі партнерського договору.

Блок ключових ресурсів описує найбільш важливі активи необхідні для функціонування бізнес-моделі.

Оскільки ідея стартапу полягає у виконанні науково-дослідної роботи з підвищення ефективності печі для переплавки алюмінієвого брухту, то основним ресурсом є інтелектуальний. Для успішного розвитку необхідно отримати патенти та авторські права на розробку. Інтелектуальний ресурс необхідний для реалізації, але він не є достатнім. Для початку потрібна фінансова складова, яку можна отримати за рахунок укладання договору попередньої оплати за виконану роботу.

Блок ключових партнерів описує мережу постачальників і партнерів, завдяки яким функціонує бізнес-модель. Можна виділити чотири типи партнерських відносин:

- 1) стратегічне співробітництво між неконкуруючими компаніями;
- 2) стратегічне партнерство між конкурентами;
- 3) сумісні підприємства для запуску нових бізнес-проектів;
- 4) відносини виробника з постачальниками для гарантії отримання якісних

комплектуючих.

Виділимо один з найважливіших мотивів створення партнерських відносин у нашому випадку – це оптимізація і економія в сфері виробництва. Немає сенсу володіти всіма ресурсами або здійснювати всі види діяльності пов'язаних з випуском кінцевої продукції. Наша компанія пропонує послуги по зменшенню витрат для заводу-виробника алюмінієвих виробів з брухту.

Блок структури витрат описує найбільш суттєві витрати необхідні для роботи в рамках конкретної бізнес-моделі. Це витрати пов'язані з функціонуванням бізнес-моделі. Створення і здійснення ціннісних пропозицій, підтримання взаємовідносин з клієнтами, отримання прибутку – всі ці процеси пов'язані з будь-якими витратами.

За структурою витрати можна розділити на наступні категорії:

- фіксовані – заробітна плата співробітників, засоби виробництва, оренда приміщення;
- змінні – послуги транспортування на об'єкти замовника в залежності від кількості замовлень, політичні ризики.

6.2 Висновки до розділу 6

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок представлено з використанням шаблону бізнес-моделі Олександра Остервальдера та Іва Піньє.

Базуючись на вище викладених матеріалах можна сказати, що майбутня комерціалізація проекту залежить від попиту, динаміки ринку і рентабельності роботи на ринку. На даний момент попит є низьким, однак динаміка ринку зростає через підвищені енергетичні та екологічні вимоги до виробництва алюмінію, в тому числі печей для переплавки алюмінієвого брухту.

Перспективи впровадження послуги технічного розрахунку та надання консультації з огляду на обмежену кількість потенційних груп клієнтів (заводів-виробників алюмінію) є не високими. При цьому бар'єри входження конкурентів в нішевий ринок є низькими. Враховуючи існуючі політичні ризики (один з найважливіших) конкурентоспроможність проекту буде програвати у боротьбі з аналогічними надавачами послуг за кордоном.

Альтернативним варіантом впровадження послуги є орієнтація на український ринок виробництва алюмінію з суттєвим розширенням асортименту надання послуг.

Подальша імплементація проекту можлива за умов високого попиту на послуги, що представляє компанія.

ВИСНОВКИ

Основними напрямками подальшого розвитку алюмінієвого виробництва є підвищення комплексного використання перероблюваної сировини (брухту) в процесі виробництва алюмінію, використання нових прогресивних енергозберігаючих технологій.

Ефективність роботи печей для переплавки алюмінієвого брухту багато в чому залежить від температурних і теплових факторів протікання технологічного процесу, умов роботи футеровки та теплоізоляції.

Аналіз розрахунків втрат теплоти зовнішніми огороженнями електричної печі наявної конструкції місткістю 6 т показав, що найбільше їх питоме значення характерно для сталевих листів, які закривають струмопідводи, і поверхонь закритих форкамер; далі за цим показником розташовуються торцеві і бокові стінки в розплаві, ці ж стінки вище рівня розплаву, подина та склепіння.

Для оцінки енергетичної ефективності печі були виконані наступні варіантні розрахунки:

- варіант 1 – базовий – піч наявної конструкції з однією форкамерою розмірами $4 \times 1 \text{ м}^2$ і терміном її відкриття $t_{\text{в}} = 60 \text{ хв}$;
- варіант 2 – піч зміненої конструкції (порівняно з варіантом 1 застосована теплоізоляція із силікату кальція замість пінодіатоміту);
- варіант 3 – піч зміненої конструкції (на відміну від варіанту 2 зменшений термін відкриття форкамер для зняття шлаку до 45 хв);
- варіант 4 – піч зміненої конструкції (на відміну від варіанту 2 в боковій стінці розміщені 2 форкамери розмірами $2 \times 1 \text{ м}^2$, термін відкриття форкамер – 30 хв кожна).

Аналіз отриманих результатів з теплового стану поверхонь огорожень показує, що, наприклад, при застосуванні силікату кальцію для теплоізоляції замість пінодіатоміту (варіант 2) температури зовнішніх поверхонь на 16 – 26 % нижче, ніж у печі наявної конструкції (варіант 1), а теплові втрати – на 28 – 45 % (середня величина біля 37 %).

З урахуванням інших елементів печі (закриті форкамери, сталеві листи в районі розміщення нагрівачів), де діатоміт в наявних конструкціях не використовувався, тобто і не відбувалась його заміна, теплові втрати через зовнішні поверхні міксера місткістю 6 т в цілому зменшуються на 26 %.

Для варіанту 2 при застосуванні теплоізоляції із силікату кальцію замість пінодіатоміту порівняно з варіантом 1 сумарні теплові втрати зменшені на 112,8 кВт год (або на 7,5 %) за рахунок їх зменшення через подину, бокові і торцеві стінки. Теплові втрати через відкриті форкамери та отвори практично не змінились. Термін плавки алюмінію зменшився на 12 хв.

Таким чином, найбільший внесок в загальні теплові втрати поверхнями печі для варіантів 2 і 1 складають втрати теплоти через відкриті форкамери при знятті шлаку, що дорівнюють більше як 1000 кВт.

Для варіанту 3 (заміна теплоізоляції і зменшенні терміну відкриття форкамери площею $F = 4 \text{ м}^2$ з 60 до 45 хв.) термін плавки порівняно з варіантом 1 зменшується на 42 хв. або на 13 %. Сумарні теплові втрати зменшились на 406 кВт або на 27 % в порівнянні з варіантом 1.

Для варіанту 4 (заміна теплоізоляції, застосування двох форкамер площею по 2 м^2 та терміном їх відкриття по 30 хв. кожна) термін плавки зменшився на 1 год 12 хв. або на 24 %. Сумарні теплові втрати поверхнями печі зменшились на 713 кВт або на 48 % в порівнянні з варіантом 1.

Результати наведених варіантних розрахунків свідчать про те, що найбільш суттєвий ефект, пов'язаний з економією витрат електроенергії для плавки алюмінію, може бути досягнутий зі зменшенням теплових втрат через відкриті форкамери (зменшенні їх площі та терміну відкриття при знятті шлаку).

На термін плавки і ККД печі впливають втрати теплоти та об'єм (внутрішній та зовнішній) при заданій місткості по алюмінію.

Враховуючи вище перераховані фактори розроблена нова конструкція печі з нахиленим склепінням. За рахунок зменшення внутрішнього об'єму печі термін плавки мінімально зменшується на 14 % у порівнянні з типовим (арковим) склепінням, а ККД збільшується на 8,2 % для базової конструкції. При цьому термін плавки і ККД для печі зі зміненою теплоізоляцією склали 8 та 6,2 % відповідно.

Для модернізованої печі потужністю 600 кВт використання газового нагріву порівняно з електричним з економічної точки зору є більш ефективно, оскільки витрати на природний газ в циклі плавки зменшуються приблизно на 10 %. Варто відмітити, що на вартість 1 циклу плавки з використанням газового нагріву у порівнянні з електричним, окрім втрат теплоти через зовнішні огорожуючі конструкції та отвори суттєво впливають величини коефіцієнта нерівномірності

В результаті розрахунку пристроїв для спалювання газоподібного палива обрано 2 пальники конструкції інституту «Теплопроект» типу ГПП-5 з продуктивністю по $80 \text{ м}^3/\text{год}$ кожний. Пальники розміщуються в боковій передній стінці печі.

З метою економії природного газу на плавку алюмінієвого брухту розглянутий варіант встановлення рекуператора для підігріву дуттьового повітря. В результаті розрахунків обрано односторонньо-голчастий металевий рекуператор з площею поверхні теплообміну 12 м^2 . В разі встановлення даного технологічного агрегату температура димових газів знижується від 800°C до 390°C , при цьому температура дуттьового повітря підвищується від 20°C до 350°C .

Величина економії палива, яка може бути досягнута при заданих вихідних даних з використанням двоходового голчастого металевого рекуператора складає 16,9 %. Однак варто

відмітити, що при визначенні економії палива не враховувався ряд позитивних явищ, зокрема, покращення якості горіння палива, зниження вмісту окису вуглецю у відхідних газів, а також підвищення продуктивності печі.

Розроблені моделі багат шарових стінок печі для переплавки алюмінієвого брухту за допомогою програми Solid Works у тривимірному вигляді з одновимірним температурним полем у формі прямокутника розмірами 200 x 200 мм.

В якості матеріалів можна використовувати будь-які та задавати і змінювати їх теплофізичні параметри для експериментів. Таке дослідження дає змогу отримати розподіл температур по товщині зовнішніх огорожувальних конструкцій печі, значення температури зовнішнього кожуха дуже швидко.

В загальній більшості точок на межі стику шарів відносна похибка у відсотках становить 10 – 35 %. Тому рекомендовано в подальших дослідженнях провести розрахунки на вищому рівні точності та з покращеною градацією розрахункової сітки. Ще однією з причин розбіжності результатів є неточність у точковому вимірюванні температури за допомогою інструменту «Вимірювання в точці».

Передбачені заходи з безпечної і комфортної роботи в приміщенні науково-дослідної лабораторії та заходи з пожежної безпеки та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок представлено з використанням шаблону бізнес-моделі Олександра Остервальдера та Іва Піньє.

Базуючись на вище викладених матеріалах можна сказати, що майбутня комерціалізація проекту залежить від попиту, динаміки ринку і рентабельності роботи на ринку. На даний момент попит є низьким, однак динаміка ринку зростає через підвищені енергетичні та екологічні вимоги до виробництва алюмінію, в тому числі печей для переплавки алюмінієвого брухту.

Перспективи впровадження послуги технічного розрахунку та надання консультації з огляду на обмежену кількість потенційних груп клієнтів (заводів-виробників алюмінію) є не високими. При цьому бар'єри входження конкурентів в нішевий ринок є низькими. Враховуючи існуючі політичні ризики (один з найважливіших) конкурентоспроможність проекту буде програвати у боротьбі з аналогічними надавачами послуг за кордоном.

Альтернативним варіантом впровадження послуги є орієнтація на український ринок виробництва алюмінію з суттєвим розширенням асортименту надання послуг.

Подальша імплементація проекту можлива за умов високого попиту на послуги, що представляє компанія.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Панов Е.Н. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е.Н. Панов, Г.Н. Васильченко, С. В. Даниленко и др.; под общ. ред. Б.С. Громова. – М.: «Руда и металлы», 1998. – 256 с.
2. Христинич А.Р. Повышение эффективности электрического плавильно-литейного агрегата / А. Р. Христинич // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – №2, том 6.
3. Диомидовский Д.А. Metallургические печи цветной металлургии/ Д.А. Диомидовский. – М.: Metallургия, 1970, – с. 704
4. Панов Е.Н. Повышение энергетической эффективности газовых литейных миксеров емкостью 25 т / Е.Н. Панов, М.Ф. Боженко, Г.Н. Васильченко и др. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 6. – С. 19 – 23.
5. Панов Е.Н. Повышение энергетической эффективности печей (миксеров) для переплавки алюминиевого лома /Е.Н. Панов, М.Ф. Боженко. М.В. Коржик и др. //Цветные металлы. – 2005. - № 5 – 6. – С. 114-117.
6. Троянкин Ю.В. Проектирование и эксплуатация огнетехнических установок: Учебное пособие / Ю.В. Троянкин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
7. Зах Р.Г. Котельные установки / Р.Г Зах. – М.: Энергия, 1968. – 352 с.
8. Винтовкин А.А. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справочное издание / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский и др. // М.: Машиностроение-1, 2011. – 496 с.
9. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 23 березня 2017 року № 338.
10. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей / Б.П. Тебеньков – М.: «Металлургия», 1975. – 296 с.
11. Матрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей / Б.С. Матрюков – Изд-во «Металлургия», 1972. – 368 с.
12. Камаев Ю.М. Інтегровані комп'ютерні технології. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. Частина 2 / Ю.М. Камаєв. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 76 с.
13. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. – Чинні від 01.10.2006. Київ: Мінбуд України, 2006. – 96 с.
14. Гавриш О.А. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

15. Остервальдер А. Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора / А. Остервальдер, П. Ив // Москва: Альпина Паблишер, 2017. – 288 с.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Боянівського Владислава Петровича

№ п/п	Найменування праць	Руко-писні або друко-вані	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кіль-кість друко-ваних аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5	6
1.	Підвищення ефективності міксерів для лиття алюмінію	Друк.	XV міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 25-28 квітня 2017 р. у 2 томах. – Т.1.- С.140	1 стор.	Боженко М.Ф.
2.	Термодинамічна ефективність опалювальних котелень	Друк.	XV міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 25-28 квітня 2017 р.	1 стор.	Куделя П.П.
3.	Оптимізація конструкції печей для переплавки алюмінієвого брухту	Друк.	Науково-технічний вісник ІХФ. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №1. – 2017. – С. 27-34	7 стор.	Панов Є.М. Боженко М.Ф. Даниленко С.В.
4.	Удосконалення конструкції печей для переплавки алюмінієвого брухту		XVI міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів	1 стор.	Боженко М.Ф.

			і студентів, м. Київ, 24-27 квітня 2018 р. у 2 томах. – Т.1.- С.186		
5.	Efficiency Upgrading Furnace for Aluminium Foundry		Science and Technology of the XXI Century: the XVIII All-Ukrainian Students R&D Conference Proceeding, (Kyiv, December 07, 2017) / National Technical University of Ukraine _Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute'. – Part I. – Kyiv, 2017. – 240 p.	1,5 стор.	Боженко М.Ф.
6.	Підвищення ефективності печей для переплавки алюмінієвого брухту (Диплом третього ступеня)	На правах рукопису	Робота на XVII Всеукраїнський конкурс „Молодь – енергетиці України – 2017-2018: Відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків” (квітень 2018)	32 стор.	Боженко М.Ф.

Нагороджений дипломом II-го ступеня за активну участь в XIV міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» у 2016 році.

Нагороджений дипломом III-го ступеня за активну участь в XV міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» у 2017 році.

Список наукових праць Боянівського В.П.: усього 6 найменувань, 3 дипломи, 1 наукова стаття, з них за темою магістерської дисертації 5, список наведений на 2 сторінках

Автор

Боянівський В.П.

Интернет + Библиотека

77.48% Оригінальність	22.52% Сходство	28 Источники
-----------------------	-----------------	--------------

Источники с Интернет : 28 источников найдено

1. http://om.net.ua/2/2_5/2_52308_konstruktsiy-rekuperatorov.html	6.74%
2. http://chemengine.kpi.ua/article/download/119465/114010	6.32%
3. http://om.net.ua/2/2_5/2_52309_konvektivnie-rekuperatori-iz-chugunnih-trub.html	4.02%
4. http://ukrefs.com.ua/page,4,89038-Modemizaciya-stenda-sushki-futerovok-i-razogreva-pogruznyh-...	3.17%
5. http://ni.biz.ua/10-5/21156.html	2.84%
6. http://uchebniks.net/book/273-vtorinni-energetichni-resursi-ta-energozberezhennya-navchalnij-posib...	1.94%
7. http://4exam.info/book_122_glava_10_Glava_2_Rozrakhunok_rekuperator%D1%96v.html	1.94%
8. http://ni.biz.ua/10-5/21157.html	1.32%
9. http://4exam.info/book_122_glava_13_2.4._Osoblivost%D1%96_teplovogo_ji_aerodinam%D1%96c...	1.16%
10. http://um.co.ua/8/8-11/8-118215.html	0.85%
11. http://4exam.info/book_122_glava_11_2.2._Teplovi_ji_rozrakhunok_rekuperatora.html	0.66%
12. http://5fan.ru/wievjob.php?id=95811	0.62%
13. http://odz.gov.ua/lean_pro/normdocs/files/dovidnikvidpovid.pdf	0.47%
14. https://revolution.allbest.ru/manufacture/00696659_0.html	0.4%
15. http://eprints.kname.edu.ua/31272/1/%D0%9C%D0%92-%D0%9A%D0%9F-126%D0%9C-1012-%	0.4%
16. http://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/3940/1/Energetika.pdf	0.33%
17. http://uran.donntu.org/~masters/2011/fmf/kosolukin/diss/indexu.htm	0.31%
18. http://masters.donntu.org/2011/fmf/kosolukin/diss/indexu.htm	0.31%
19. http://allrefs.net/c12/4ccmh/p1	0.24%
20. http://lib.sumdu.edu.ua/library/docs/Books/vragov.pdf	0.24%
21. http://studopedia.com.ua/1_128394_susharkah.html	0.24%
22. http://ci.kpi.ua/Books/pechi_stepanuk.pdf	0.19%
23. http://stud.wiki/physics/3c0b65635a2bc78b4c43a88521216c37_0.html	0.19%
24. http://megapredmet.ru/2-4360.html	0.19%
25. http://ci.kpi.ua/METODA/pechi_konsp.pdf	0.19%
26. http://studopedia.org/index.php?vol=1&post=51109	0.19%
27. http://ni.biz.ua/19-15/86143.html	0.19%
28. https://knowledge.allbest.ru/physics/3c0b65635a2bc78b4c43a88521216c37_0.html	0.19%